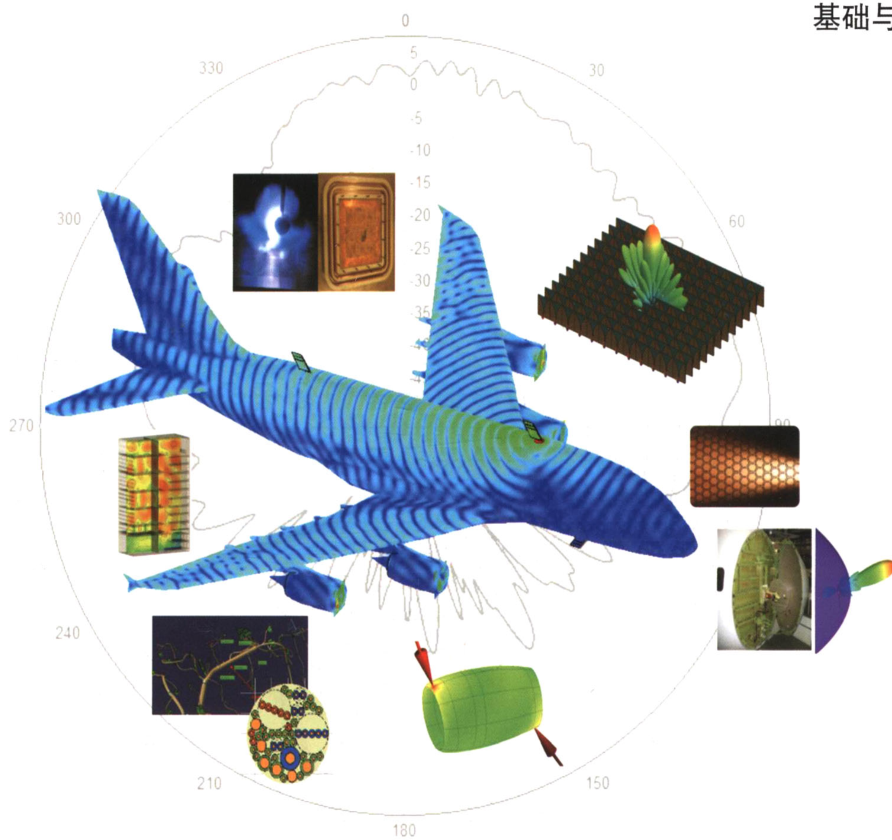
FEKO

基础与实战系列丛书



FEKO 仿真原理与工程应用

刘 源 焦金龙 王 晨 王晓峰 等编著



关注机械工业出版社计算机分社官方微信订阅号“IT 有得聊”，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材文件和操作教学视频



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



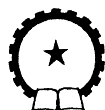
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

FEKO 基础与实战系列丛书

FEKO 仿真原理与工程应用

刘　源　焦金龙　王　晨　王晓峰　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书基于 FEKO 的最新版本 FEKO 14.0 编写，此版本较旧版本新增了时域有限差分（FDTD）算法，支持更多的混合算法和功能特性。本书传递了作者们多年技术支持工作中积累的应用技巧和心得体会，会极大帮助初学者和工程人员提升工作效率。本书涵盖了 FEKO 的所有重点应用领域，包含多样化及最新的热门应用，如 CMA、汽车电磁兼容、生物电磁等，贴近 FEKO 用户的实际使用场景。读者读完此书会对 FEKO 的优势和特点有全面的了解。

本书主要适用于从事天线、雷达、微波、射频以及电磁兼容领域相关设计和特性研究的工程技术人员和高校师生等，既可以作为航空航天、汽车、电子、通信、船舶和军工等行业进行工程分析的参考用书，也可以作为计算电磁学和 FEKO 软件的教学用书和培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

FEKO 仿真原理与工程应用 / 刘源等编著．—北京：机械工业出版社，2017.1
（FEKO 基础与实战系列丛书）
ISBN 978-7-111-56144-6

Ⅰ．①F… Ⅱ．①刘… Ⅲ．①电磁场－有限元分析－应用软件
Ⅳ．①O441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 034320 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦　　责任编辑：张淑谦　陈瑞文
责任校对：张艳霞　　责任印制：李　昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 6 月 • 第 1 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 32.75 印张 • 799 千字
0001－3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-56144-6
定价：95.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：（010）88361066
读者购书热线：（010）68326294
（010）88379203
封面无防伪标均为盗版

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金 书 网：www.golden-book.com

序　　一

FEKO（出自德语“FEldberechnung für Körper mit beliebiger Oberfläche”，意为任意形状目标体的各种类型的电磁场分析）最早源于 20 世纪 90 年代初利用矩量法（MoM）解决金属体（金属表面和导线）电磁兼容和天线问题的研究代码。研究人员很快发现，将矩量法（用于仿真精细结构，如天线）和高频近似算法（用于仿真大型载体，如飞机机身）进行混合是解决电大尺寸问题的必由之路。必须提及的是，当时的计算机运行速度缓慢，内存配置也很低，甚至还比不上如今的智能手机。1994 年，结合了矩量法与物理光学法的混合算法 MoM/PO 诞生了。

多年来，FEKO 愈加成熟，不断增加先进的计算方法以满足新的应用和市场需求。不仅包括更加高效的求解器（如 MLFMM——多层快速多级子算法，以及加入很多加速算法的 RL-GO——射线寻迹几何光学法），而且优化和扩展了现有求解器，以支持特定的功能来解决复杂的实际问题（集成风窗天线即是一个例子）。FEKO 当前版本 FEKO 14.0（本书即基于此版本）是一个高级的、采用最先进技术的通用电磁仿真软件包。FEKO 主要用于高频应用，也有一些在较低频段的扩展应用（本书亦有所涉及，如 AM 天线和低频屏蔽等）。

本书给出了 FEKO 相关的计算电磁学概述，介绍并阐述了 FEKO 中的多种计算方法，如 MoM、MLFMM、PO、RL-GO 以及 FEM（有限元法）和 FDTD（时域有限差分法）等，应用涉及雷达系统、天线、天线布局、电磁兼容、波导、天线罩、微带电路和生物电磁等多个领域。

本书还讨论了 FEKO 用户界面以及前后处理模块 CADFEKO 和 POSTFEKO。高级 FEKO 用户将会发现关于 LUA 脚本的章节特别有用，它展示了 FEKO 用户界面的最强大的功能。此外，还有一些包含 FEKO 高级功能的章节，如 CMA（特征模式分析）、周期性结构、优化、线缆建模及采用等效源的模型分解等。

我非常高兴看到这本书能与广大中国科研及工程人员见面。衷心希望本书能给应用数值方法和仿真技术的读者带来借鉴作用，尤其是带给 FEKO 用户切实的帮助！



Dr. Ulrich Jakobus

FEKO 创始人、IEEE Fellow、ACES Fellow

Altair 电磁方案副总裁

2016 年 7 月

序　二

150 多年前，麦克斯韦预言了电磁波的存在，至今电磁场理论与微波技术已经广泛应用于国防、民用通信、医疗、射电天文、导航等各个领域。如今，包括毫米波与太赫兹在内的高频技术备受关注，天线设计、雷达隐身、电磁兼容等典型应用场景也从大型军工系统延伸到民用车辆、即时通信、产品标签和物联网应用等民用领域。随着科技的发展，电磁场与微波技术将会对社会经济、国防以及人们日常生活的各个方面产生更加深远的影响。

电磁仿真软件是用计算电磁学方法解决实际问题的有效工具。在复杂的工程设计中，相较于凭借工程师个人的经验来推断和测试，利用成熟的商业软件进行仿真验证和优化修正可以极大地提升效率和准确性，FEKO 即是其中一款非常优秀的三维电磁场仿真软件。FEKO 软件基于矩量法（MoM）实现对 Maxwell 方程组的求解，并实现将矩量法和高频近似算法（包括 PO、UTD 等）相结合的混合算法，特别适合求解电大尺寸等复杂的电磁问题。FEKO 也是首款将多层快速多极子方法（MLFMM）成功商用的软件，在国内已经拥有众多用户。

最早对 FEKO 的了解是基于其原理上的独特性，即将高频方法与矩量法结合实现计算时间和计算精度的有效提升，以及内存的节省。该方法特别适合于整体偏向平滑而局部比较复杂的结构。之后，该软件逐渐演进为一款功能强大的电磁仿真软件，适用于解决各种电大复杂的电磁问题。

2014 年，Altair 与东南大学毫米波国家重点实验室联合成立了 FEKO 培训中心。在两年多的合作中，FEKO 工程师认真细致的工作态度和严谨执着的专业精神令我们印象深刻。本书作者刘源博士具备深厚的电磁领域背景，焦金龙、王晨和王晓峰等也都拥有超过 10 年的电磁领域应用经验，他们平时的大量时间都与 FEKO 用户一起，协助解决各类应用场景的实际问题，本书凝聚了他们多年的工程经验和软件使用心得，对于具备一定电磁基础知识的 FEKO 初学者和相关领域有应用需求的工程人员将有很大帮助。

希望通过此书的出版，能帮助国内电磁领域的专业人士更加高效地掌握 FEKO 软件工具的特点和优势，快速解决实际问题，在实现高效工作的同时，将更多精力用于科研创新，提升我国电磁行业的整体水平。



洪伟教授
教育部长江学者计划特聘教授、IEEE Fellow、CIE Fellow
东南大学信息科学与工程学院院长、毫米波国家重点实验室主任

前　言

FEKO 进入中国市场已经整整 15 个年头，从最初的 1.0 版本发展到今天，Altair 中国 FEKO 技术团队的很多成员经历了与 FEKO 的共同成长，见证了软件的发展历程，在为客户服务的过程中，积累了大量的软件技巧和工程经验。目前，市场上关于 FEKO 的中文书籍很少，只能通过一些有限的渠道进行学习和交流。因此，我们深感同广大电磁仿真领域从业人员及 FEKO 使用者分享技术和经验的重要性。

2015 年，FEKO 加入 Altair HyperWorks 产品体系。2016 年 3 月，随着 HyperWorks 14.0 正式发布，FEKO 版本号也从 7.0 升级为 14.0。FEKO 14.0 包含了众多新功能和求解器性能的改进，为广大用户带来全新的应用体验。本书是“FEKO 基础与实战系列丛书”的第 1 本——FEKO 基础篇。本书基于 FEKO 14.0（书中大部分应用案例和仿真流程同样支持 FEKO 7.0，网盘所包含的例子和视频基于 FEKO 7.0 和 FEKO 14.0 两个版本），详细介绍了前处理模块 CADFEKO、后处理模块 POSTFEKO 和脚本编辑模块 EDITFEKO 的使用技巧以及求解方法选择的经验总结，并给出了非常全面的应用实例及仿真实现流程。

全书包括两大部分共 10 章。第 1 部分主要为电磁场理论、行业工程问题及 FEKO 软件介绍等基础内容，包括 4 章：第 1 章概述电磁场基础以及雷达工程相关问题；第 2 章结合具体工程应用详细介绍 FEKO 所使用的电磁计算方法，以加深读者对算法选择的理解；第 3 章对 CADFEKO、POSTFEKO 和 EDITFEKO 三大模块的软件界面、菜单、图标按钮等进行详细说明，便于读者快速查阅和掌握；第 4 章针对天线设计师所关心的端口选择和激励设置等问题给出选择原则，并做总结说明。对于系统设计师所关心的等效源技术与数据格式、网格剖分原则以及计算方法如何选择等，在第 4 章也进行了总结。同时，为方便利用 FEKO 进行二次开发，本书介绍了 LUA 脚本的语法基础，并附大量 LUA 脚本实例供读者学习参考。

第 2 部分主要介绍行业应用和丰富的 FEKO 工程应用案例，包括 6 章：第 5 章介绍工程上几类常用天线的仿真实现，与第 4 章的天线端口设置和激励相对应；第 6 章详细介绍 FSS 设计、雷达天线罩透波和瞄准误差（BSE）的仿真实现，提供了完整的 LUA 脚本和 MATLAB 脚本得到的瞄准误差曲线；第 7 章为载体天线布局的仿真应用；第 8 章介绍关于复杂线缆束的快速建模以及线缆辐射/抗干扰的仿真流程；第 9 章为各类目标体的雷达散射截面（RCS）仿真应用实例；第 10 章为一些特色应用，包括非辐射网络、等效馈电网络与天线一体化仿真、降低计算复杂度、常用优化方法以及如何通过优化得到天线的最佳电性能、特征模分析方法在天线设计中的应用、机箱屏蔽和生物电磁等。

本书内容主要由刘源、焦金龙、王晓峰、王晨编写，参与编写的还有陶津平、李岳春、甘海和马小康。此外，Altair 市场部的王蔓女士负责与出版社的沟通，并对该书的框架提出了宝贵建议，Altair 电磁技术团队的其他成员曾庆豪、王琪、实习生杨晨晨参与了本书的校稿，在此深表感谢！

由于编者水平有限，虽然已经多次校对，但书中错误和不足之处在所难免，敬请专家和广大读者不吝指正。

编　者

目　录

序一
序二
前言

第 1 章　电磁场基础与雷达工程问题概述 …… 1

1.1 无线电波 …… 2
1.2 雷达 …… 3
1.3 主要的电磁场问题 …… 6
1.3.1 天线 …… 6
1.3.2 雷达目标隐身 …… 9
1.3.3 天线罩 …… 10
1.3.4 电磁兼容 …… 14
1.3.5 电波传播 …… 15
1.4 电磁理论基础 …… 16
1.4.1 麦克斯韦方程组 …… 16
1.4.2 介质本构关系 …… 17
1.4.3 求解域的边界条件 …… 17
1.4.4 阻抗边界条件 …… 18

第 2 章　电磁场数值计算方法 …… 19

2.1 矩量法（Method of Moments）的原理与实现 …… 20
2.1.1 矩量法的原理与实现 …… 20
2.1.2 典型应用 …… 25
2.2 多层快速多极子（MLFMM）的原理与实现 …… 26
2.2.1 多层快速多极子的原理与实现 …… 26
2.2.2 典型应用 …… 30
2.3 有限元（FEM）的原理 …… 31
2.4 时域有限差分（FDTD） …… 32
2.5 高频近似方法 …… 34
2.6 主要的混合方法 …… 35
2.6.1 矩量法与有限元混合原理 …… 35
2.6.2 多层快速多极子与有限元混合技术 …… 36
2.6.3 矩量法与高频混合技术 …… 37
2.6.4 多层快速多极子与高频混合技术 …… 37

第 3 章　FEKO基础 …… 39

3.1 FEKO 工作环境介绍 …… 40
3.1.1 FEKO 主要模块组成 …… 40
3.1.2 FEKO 文件组成与各模型之间的关系 …… 40
3.1.3 关于命令行提交方式和批处理说明 …… 45
3.1.4 命名规则说明 …… 46
3.2 前处理模块——CADFEKO …… 46

3.2.1 菜单栏与工具按钮……………………48
3.2.2 模型与求解树形管理器……………58
3.2.3 3D 模型视图窗口……………………60
3.2.4 信息管理窗口…………………………61
3.2.5 快捷工具条……………………………61
3.2.6 主要的快捷键…………………………62
3.3 后处理模块——POSTFEKO…… 62
3.3.1 菜单与工具按钮集……………………63
3.3.2 工程与树形管理器……………………67
3.3.3 3D/2D 结果视图显示…………………67
3.3.4 计算参数设置面板……………………68
3.4 命令流脚本编辑器 EDITFEKO·· 69
3.4.1 脚本编辑区域…………………………70
3.4.2 命令函数控制面板……………………71
3.4.3 常用命令函数的说明与应用………71
3.5 相对工作平面（Workplane）的应用……………………………………75
3.5.1 何时用到 Workplane…………………75
3.5.2 定义 Workplane………………………77
3.5.3 基于 Workplane 建模…………………79
3.6 建立 FEKO 工程的仿真过程……87
3.6.1 主要功能与仿真流程…………………87
3.6.2 建立 FEKO 工程的一般过程………88

第 4 章 FEKO软件的使用技巧与方法选择

第 4 章 FEKO软件的使用技巧与方法选择……………………………89
4.1 天线的端口与激励…………………90
4.1.1 线端口与电压源激励…………………90
4.1.2 棱边端口与电压源激励………………91
4.1.3 波导端口与波导激励…………………91
4.1.4 有限元模式端口与激励………………92
4.1.5 微带线端口与激励……………………92
4.1.6 远、近场等效技术……………………93
4.2 网格剖分技术…………………………97
4.3 FEKO 的方法选择技巧…………100
4.4 主要的求解参数设置……………107
4.4.1 近场设置………………………………107
4.4.2 远场设置………………………………109
4.4.3 S 参数求解设置………………………111
4.5 LUA 脚本基础与应用……………112
4.5.1 LUA 脚本基础…………………………112
4.5.2 FEKO 的 LUA 脚本功能……………126

第 5 章 工程仿真案例 1——常用工程天线

第 5 章 工程仿真案例 1——常用工程天线……………………………136
5.1 半波振子天线………………………137
5.1.1 振子天线设计背景与原理…………137
5.1.2 半波振子天线的仿真实现…………137
5.2 矩形波导天线………………………149
5.3 低频线圈天线………………………161
5.4 圆波导圆极化天线…………………172
5.4.1 TE11 模圆极化仿真…………………173
5.4.2 高次模圆极化的实现…………………183
5.5 偏馈反射面天线……………………185
5.5.1 全模型仿真实现………………………187
5.5.2 等效技术的实现………………………201
5.6 微带天线……………………………217
5.6.1 矩量法（MoM）的实现……………218
5.6.2 时域有限差分（FDTD）的实现…………………………………………227
5.7 介质谐振天线（DRA）…………229
5.7.1 矩量法（MoM）的实现……………229
5.7.2 矩量法/有限元（MoM/FEM）混合法的实现…………………………241

5.8 波导缝隙天线 ………………………… 249
5.8.1 波导缝隙天线的设计背景……… 249
5.8.2 基于多层快速多极子（MLFMM）的实现 ……………………………………… 250
5.9 相控阵天线 ………………………… 261
5.9.1 相控阵天线的设计原理 ………… 261
5.9.2 EDITFEKO 脚本控制的仿真实现……………………………………… 262
5.10 汽车车窗天线（Windscreen） …………………272
5.10.1 车窗天线仿真技术……………… 272
5.10.2 车窗天线布局的仿真实现……… 272

第 6 章 工程仿真案例 2——天线罩设计与仿真 …………………… 279

6.1 天线罩快速设计 …………………… 280
6.1.1 格林函数法（SGF） ……………… 280
6.1.2 周期边界法（PBC） ……………… 287
6.2 天线罩透波分析 …………………… 298
6.2.1 天线罩仿真流程与求解器选择技巧 ……………………………………… 298
6.2.2 FEKO 软件的仿真实现 ………… 299
6.3 天线罩瞄准误差（BSE）仿真…………………………………… 311
6.3.1 FEKO 软件的仿真实现 ………… 312
6.3.2 与 MATLAB 联合实现 ………… 319

第 7 章 工程仿真案例 3——载体平台天线布局 …………………… 321

7.1 FEKO 的 GridSearch 扫参技术 ………………………………… 322
7.2 锥台结构平台上的多天线隔离度………………………………… 330
7.3 直升机天线布局仿真 ……………343
7.4 车内天线布局 ……………………358

第 8 章 工程仿真案例 4——复杂线缆束EMC ……………………… 371

8.1 复杂线缆束 EMC 分析流程 ….. 372
8.2 复杂线缆束 EMC 仿真在 FEKO 中的实现 ……………………………… 372
8.2.1 线缆类型与快速建模…………… 372
8.2.2 天线与屏蔽线缆束的场线耦合…… 376
8.2.3 线缆束的辐射与抗干扰仿真…… 385

第 9 章 工程仿真案例 5——电磁散射 ……………………………… 404

9.1 电磁散射单站与双站 RCS …… 405
9.2 FEKO 典型目标体的仿真应用 … 408
9.2.1 金属球锥体的单站 RCS 计算…… 408
9.2.2 介质金属混合体的单站 RCS …… 428

第 10 章 其他工程仿真案例 ········· 445

10.1 非辐射网络应用 ········· 446
10.1.1 S 参数非辐射网络 ········· 446
10.1.2 传输线网络的级联 ········· 464
10.1.3 天线匹配网络与天线的一体化仿真 ········· 467
10.2 天线优化设计 ········· 470
10.2.1 常用的优化技术 ········· 470
10.2.2 FEKO 软件的仿真实现 ········· 470
10.3 天线特征模分析（CMA） ········· 478
10.3.1 CMA 理论背景 ········· 478
10.3.2 FEKO 天线特征模分析的仿真实现 ········· 479
10.4 机箱屏蔽效能 ········· 492
10.4.1 问题描述 ········· 492
10.4.2 FEKO 中的仿真实现 ········· 493
10.5 生物电磁 ········· 503

第 1 章



电磁场基础与雷达工程问题概述

1.1　无线电波

1.2　雷达

1.3　主要的电磁场问题

1.4　电磁理论基础

1.1 无线电波

无线电波是指在自由空间（包括空气和真空）传播的射频频段的电磁波。无线电波的波长越短，相同时间内传输的信息就越多。

无线电波是一种电磁波，以 TEM 波（横电磁波）的形式传播。电磁波包含很多种类，按照频率从低到高的顺序排列为：无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线及 γ 射线。无线电波分布在 3Hz～3000GHz 的频率范围之间。在这个频谱内可以细划为 12 个波段，具体见表 1-1。

表 1-1　无线电波的划分

波段		频率范围	波长范围
极长波（ELF，极低频）		3～30 Hz	10^5～10^4 km
超长波（SLF，超低频）		30～300 Hz	10^4～10^3 km
特长波（ULF，特低频）		300～3000 Hz	1000～100 km
甚长波（VLF，甚低频）		3～30 kHz	100～10 km
长波（LF，低频）		30～300 kHz	10～1 km
中波（MF，中频）		300～3000 kHz	1000～100 m
短波（HF，高频）		3～30 MHz	100～10 m
超短波（VHF，甚高频）		30～300 MHz	10～1 m
微波	分米波（UHF，特高频）	300～3000 MHz	10～1 dm
	厘米波（SHF，超高频）	3～30 GHz	10～1 cm
	毫米波（EHF，极高频）	30～300 GHz	10～1 mm
	亚毫米波（THF）	300～3000GHz	1～0.1mm

射频与微波

射频（Radio Frequency，RF）表示可以辐射到空间的电磁频率，频率范围为 300kHz～300GHz，它是一种高频交流变化电磁波的简称，人们在日常生活中所接触的手机与基站以及射频识别（RFID）等应用均属于射频领域的问题。

微波是指频率范围为 300MHz～300GHz 的电磁波，又是射频的较高频段，是无线电波中一个有限频带的简称，即波长在 0.1mm～1m 之间的电磁波，是分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波的统称。微波频段的具体划分见表 1-2。

表 1-2　微波频段的划分

波段代码	标称波长/cm	频率/GHz	波长范围/cm
L	22	1～2	15～30
S	10	2～4	7.5～15
C	5	4～8	3.75～7.5
X	3	8～12	2.5～3.75

（续）

波段代码	标称波长/cm	频率/GHz	波长范围/cm
Ku	2	12～18	1.67～2.5
K	1.25	18～27	1.11～1.67
Ka	0.8	27～40	0.75～1.11
U	0.6	40～60	0.5～0.75
V	0.4	60～80	0.375～0.5
W	0.3	80～100	0.3～0.375

1.2 雷达

雷达是集中了现代电子科学技术各种成就的高科技系统，现在已经广泛应用于地面（含车载）、舰载、机载和弹载方面，执行着各种军事任务和民用任务。近年来，雷达应用已经向外层空间发展，出现了面向卫星载、航天飞机载、宇宙飞船载等应用的空间基雷达，建立比地面预警雷达、机载预警雷达和超视距预警雷达更优越的星载预警监视雷达。同时，雷达也在向空间相反方向发展，出现了各种探地雷达，它已经应用于探雷、资源勘探、地下构造“窥探”、地下危险物品侦察以及探月等方面。另外，在民用各部门，如气象与天文、遥感遥测、船只导航、直升机、汽车防撞、交通管制等领域，雷达的应用也越来越广泛。典型雷达应用场景如图 1-1 所示。



图 1-1　典型雷达应用场景

雷达（Radar）是“Radio Detection and Ranging”缩写的音译，是一种通过发射电磁波和接收目标回波，对目标进行探测和测定目标信息（距离、距离变化率或径向速度、方位、高度等）的设备，其工作原理与功能框图如图 1-2 和图 1-3 所示。

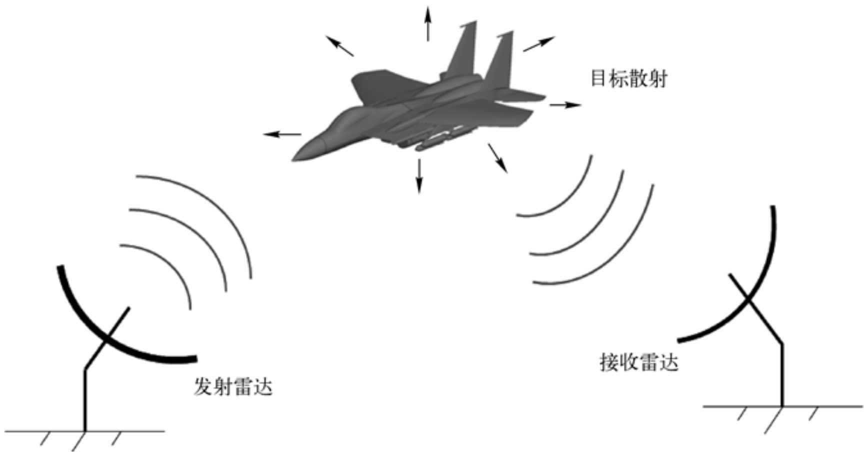


图 1-2　雷达工作原理示意图

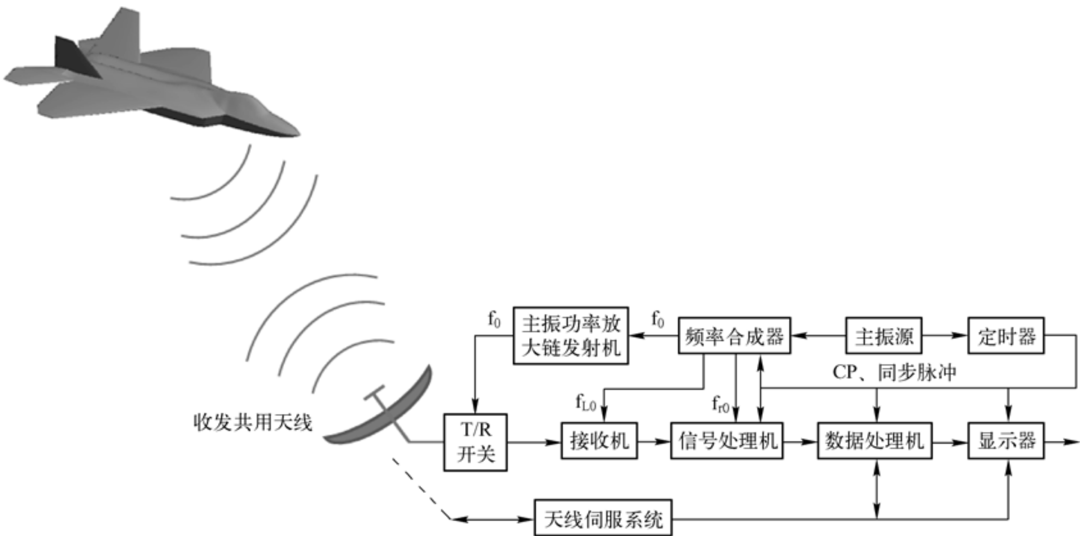


图 1-3　雷达功能框图

雷达主要战术参数和定义介绍如下：

1）探测空域。指雷达能够以一定的检测概率和虚警概率、一定的目标起伏模型和一定的目标雷达截面积探测到目标的空间。它是由雷达最大探测距离、最小探测距离、方位扫描角、俯仰扫描角所构成的空间。

2）目标参数测量。目标参数包括目标距离、方位角、俯仰角（或高度）、速度、批次、机型和敌我识别等，精确地测量目标的空间坐标是雷达的主要任务。

3）分辨力。雷达分辨力是指雷达能分辨空间两个靠近目标的能力。

① 距离分辨力。指在同一个方位上，能够区分两个在距离上比较靠近目标 T1 和 T2 的最小距离 ΔR，$\Delta R=\frac{1}{2}c\tau$，其中$\tau$为雷达发射脉冲宽度。示意图如图 1-4a 所示。

② 方位/俯仰角分辨力。指在同一距离上，能够区分两个在方位/俯仰上比较靠近目标 T1 和 T2 的最小角度 $\Delta\theta$，$\Delta\theta$ 是雷达天线半功率点波束角。示意图如图 1−4b 所示。

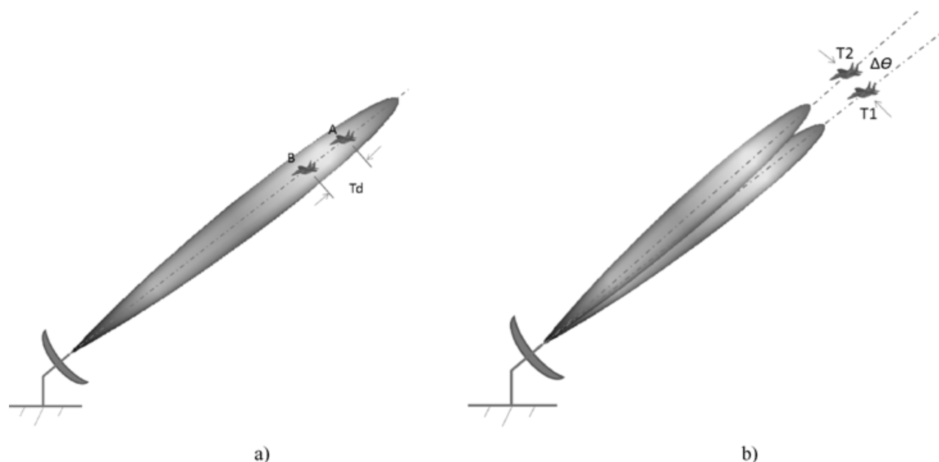


图 1−4　分辨力

a) 距离分辨力示意图　b) 方位/俯仰角分辨力示意图

注：$\Delta\theta_{方位}=\theta_{方位0.5}$，$\Delta\theta_{俯仰}=\theta_{俯仰0.5}$

4）雷达抗干扰能力。指雷达在电子战环境中采取各种对抗措施后，雷达生存或自卫距离改善的能力。

雷达的主要技术参数和定义介绍如下：

1）雷达工作频率——f_0。

2）雷达发射脉冲功率——P_t。

3）脉冲信号参数。雷达不模糊的最大测量距离是$R_{max} = 0.5c(0.8T_r)$，其中c是光速，T_r是发射脉冲的重复周期。

4）雷达天线参数。天线形式包括线天线、面天线、平板裂缝天线、阵列天线等。

① 反射面/阵面尺寸。

② 主波束增益 G。

③ 第一副瓣电平和平均副瓣电平。

④ 天线波束形状、主波束宽度$\theta_{方位0.5}$和$\theta_{俯仰0.5}$等。

5）接收机灵敏度。指雷达以一定的检测概率和虚警概率所能探测到目标的最小回波信号功率，即$P_{min} = kT_0B_nF_n(S/N_0)_{min}$。式中，$k$是玻耳兹曼常数；$T_0$为等效噪声温度；$B_n$为等效噪声带宽；$F_n$为噪声系数；$(S/N_0)_{min}$为能够探测到目标的最小信噪比。

6）雷达抗干扰技术等。

雷达距离方程，对于单基地雷达收发共用天线 $P_r = \dfrac{P_tG^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3R^4}$。式中，$P_t$为发射机发射功率；$G$为收发天线增益；$\lambda$为雷达工作波长；$\sigma$为目标雷达散射截面积；$R$为雷达与目标间距。

根据接收机信号检测理论：

当 $P_\text{r} > S_{\text{imin}}$ 时，雷达才能可靠地检测到目标。

当 $P_\text{r} = S_{\text{imin}}$ 时，雷达发现目标的最大探测距离$R_{\max}$。

当 $P_\text{r} < S_{\text{imin}}$ 时，雷达不能检测到目标。

所以 $P_\text{r} = S_{\text{imin}} \dfrac{P_\text{t} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{\max}^4}$，其中 $R_{\max}^4 = \dfrac{P_\text{t} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\text{imin}}}$。

用信噪比表示雷达方程：

因为 $S_{\text{imin}} = kT_0 B_\text{n} F_0 \left(\dfrac{S_0}{N_0}\right)_{\min} = kT_0 B_\text{n} F_0 M$ 。

所以 $R_{\max}^4 = \dfrac{P_\text{t} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\text{imin}} kT_0 B_\text{n} F_0 M}$。

由方程可以得出：最大探测距离$R_{\max}$与发射机输出脉冲功率的四次方根成正比，与接收机灵敏度（S_{imin}）的四次方根成反比，与天线增益或有效接收面积的平方根成正比，与目标雷达散射截面积的四次方根成正比，与接收机的噪声系数以及显示器的识别系数的四次方根成反比。

不难想象，与雷达相关的应用包含了天线与天线罩、雷达的隐身/反隐身、电波传播等。

1.3 主要的电磁场问题

1.3.1 天线[1]

天线在无线电设备中的主要功能有两个：能量转换和定向辐射（或接收）。

能量转换功能是指导行波与自由空间波之间的转换，发射天线是将馈线引导的电磁波（高频电流）转换为向空间辐射的电磁波传向远方，接收天线是将空间的电磁波（高频电流）转换为馈线引导的电磁波送给接收机。

定向作用是指天线辐射或接收电磁波具有一定的方向性，根据无线电系统设备的要求，发射天线可把电磁波能量集中在一定的方向上辐射出去，接收天线可只接收特定方向传来的电磁波。

天线的种类非常多，对其进行分类是十分困难的。不同的分类方法会有不同的结果，如果按照天线辐射方式分类，考虑天线结构、工作频段和应用等因素，可以把天线分为以下几种类型，具体见表 1-3。

表 1-3　天线分类

天线类型	天线名称	天线形式
线天线	单极子天线及其变形、偶极子天线及其变形、环天线、缝隙天线、双锥天线、鞭状天线、螺旋天线、对数周期天线、风窗天线、八木天线、菱形天线、加载天线等	

（续）

天线类型	天线名称	天线形式
孔径天线/面天线	角锥喇叭、扇形喇叭、圆锥喇叭、双脊喇叭、多模喇叭、混合模喇叭、波纹喇叭 单反射面天线、双反射面天线（卡塞格伦天线）、偏置反射面天线、环焦反射面天线、切割反射面天线、透镜天线、赋形反射面天线等	
微带/贴片天线	威尔第天线、GPS 微带天线、微带平面螺旋天线、微带对数周期天线等	
阵列天线	测射阵、端射阵、直线阵、平面阵、圆形阵、共形阵、自适应阵、多波束阵、相控阵、极低副瓣阵、平板裂缝阵、微带阵、基站天线等	
载体天线	机载天线、弹载天线、星载天线、舰载天线、车载天线等	

在天线的分析和设计中，主要关心以下性能指标参数：

方向图。天线的空间辐射（或接收）在不同的方向是不同的，可以用方向性函数$f(\theta,\varphi)$来描述，其归一化方向性函数可记为$F(\theta,\varphi)=\dfrac{f(\theta,\varphi)}{f_{max}}$，式中，$f_{max}$是方向性函数$f(\theta,\varphi)$的最大值。

根据天线方向性函数 $f(\theta,\varphi)$或 $F(\theta,\varphi)$绘制的图形称为天线的方向图，表示辐射（或接收）场强振幅方向特性的称为场强振幅方向图，表示辐射（或接收）功率方向特性的称为功率方向图，表示相位特性的称为相位方向图，表示极化特性的称为极化方向图。通常，我们提到方向图均指场强振幅方向图。天线方向图一般是一个三维空间的曲面图形。但工程上为了方便，常采用两个正交主平面上的剖面图来描述天线的方向性，通常取 E 平面（即电场矢量与传播方向构成的平面）和 H 平面（即磁场矢量与传播方向构成的平面）内的方向图。

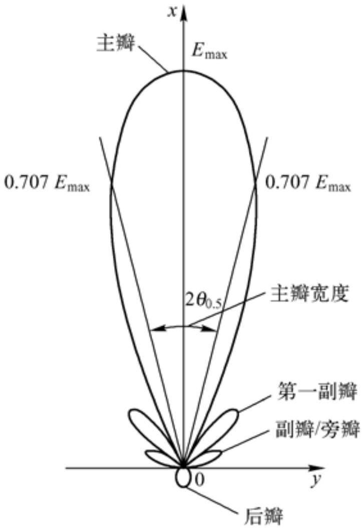


图 1−5　天线方向图

绘制某一平面的方向图，可采用极坐标或直角坐标，天线方向图一般呈花瓣状，所以也称为波瓣图，其中最大的波瓣称为主瓣，其余的称为副瓣或旁瓣，如图 1−5 所示。

主瓣宽度是指方向图主瓣上两个半功率电平点（即场强从最大值降到 0.707 最大值处）之间的夹角，记为 $2\theta_{0.5}$，有时也称主瓣宽度为半功率波束宽度，显然，主瓣宽度越小，说明天线辐射能量越集中（或接收能力越强），定向作用或方向性越强。

副瓣电平是指副瓣最大值与主瓣最大值之比，通常用分贝数表示为

$$副瓣电平(\mathrm{dB}) = 20\lg\frac{副瓣最大场强值}{主瓣最大场强值}$$

由于副瓣方向通常是不需要辐射（或接收）能量的方向，因此，天线副瓣电平越低，表明天线在不需要的方向上辐射的能量越弱，或者在这些方向上对杂散波的抑制能力越强。在很多系统 EMC 中，许多干扰就是通过副瓣耦合进来的，有效降低副瓣电平是降低干扰的一种方法。

前后比是指最大辐射（或接收）方向（设为 0°方向）的场强值与 $180^{\circ}\pm60^{\circ}$方向内最大场强值之比，通常用符号F/B表示，因此，前后比的分贝值为

$$F/B(\mathrm{dB}) = 20\lg\frac{前区最大场强值}{后区最大场强值} \quad (\mathrm{dB})$$

方向性系数 D 表示天线辐射的能量在空间分布的集中能力，定义为在相同的辐射功率情况下，天线在给定方向的辐射强度与平均辐射强度之比，即

$$D(\theta,\varphi) = \frac{E^2(\theta,\varphi)}{E_0^2} \quad （条件是在相同的辐射功率下）$$

式中，$E(\theta,\varphi)$ 是该天线在 (θ,φ) 方向某点产生的场强，E_0是全方向性点源天线在同一点产生的场强。一般情况下所关心的均为最大辐射方向的方向性系数。对于互易天线，发射天线的方向性系数与接收天线的方向性系数在数值上是相同的，所以，接收天线的方向图可以按照发射天线的仿真流程来得到其性能参数。

增益 G。方向性系数是以辐射功率为基点，没有考虑天线的能量转换效率。为了更完整地描述天线性能，改用天线输入功率为基点来定义天线增益，即在输入功率相同条件下，天线在某方向某点产生的场强平方与点源天线在同方向同一点产生场强平方的比值，于是，天线的增益为

$$G(\theta,\varphi) = \frac{E^2(\theta,\varphi)}{E_0^2} = \eta D(\theta,\varphi) \quad （条件是在相同的输入功率下）$$

式中，η为辐射功率与输入功率的比值，称为效率。

天线的输入阻抗定义为输入端电压和电流之比，即 $Z_{\mathrm{i}} = \dfrac{V_{\mathrm{i}}}{I_{\mathrm{i}}}$。

当输入电压与输入电流同相时，输入阻抗呈纯阻性，一般情况下输入阻抗具有电阻和电抗两个部分，$Z_{\mathrm{i}} = R_{\mathrm{i}} + jX_{\mathrm{i}}$，电阻主要包括辐射电阻和损耗电阻。辐射电阻的大小表示天线辐射和接收能力的强弱，损耗电阻表示天线自身对于微波能量的损耗。

与发射机或接收机相连的天线，其输入阻抗则等效为发射机或接收机的负载。因此，输入阻抗值的大小就表征了天线与发射机或接收机的匹配状况，即表示了导行波与辐射波之间能量转换的好坏，故是天线的一个重要电路参数。

反射系数 $\varGamma$ 与驻波系数 $VSWR$：表征天线与馈线匹配情况，由反射系数或驻波比就可以计算出从天线反射回发射机（或接收机）的功率是多少，公式为

$$Z_{\mathrm{i}} = Z_0\frac{1+\varGamma}{1-\varGamma} \quad \varGamma = \frac{Z_{\mathrm{i}} - Z_0}{Z_{\mathrm{i}} + Z_0} \quad VSWR = \frac{1+|\varGamma|}{1-|\varGamma|}$$

所以，设计天线时，必须对天线进行匹配设计，Optenni Lab 是一款针对线天线、手机天线的快速匹配设计软件，可以直接读入 FEKO 或测试仪器得到的天线端口 S11，进行匹配电路设计，并可以给出多种匹配方案，读者可以登录 https://www.optenni.com/了解更详细的信息。

极化天线。极化是描述天线辐射电磁波场矢量空间指向的参数。由于电场与磁场有恒定的关系，故一般都以电场矢量的空间指向作为天线辐射电磁波的极化方向。

电场矢量在空间的取向固定不变的电磁波叫线极化，有时以地面为参考。电场矢量方向与地面平行的称为水平极化，与地面垂直的称为垂直极化。电场矢量与传播方向构成的平面称为极化平面。垂直极化波的极化平面与地面垂直；水平极化波的极化平面则垂直于入射波、反射波和入射点地面的法线构成的入射平面。

当电场矢量取向随时间而变化时，其矢量端点在垂直于传播方向的平面内描绘的轨迹是一个椭圆，称为椭圆极化；描绘的是一个圆，则称为圆极化。

椭圆极化波和圆极化波都有左、右旋向特性。工程上规定：沿电磁波传播方向看去，电场矢量随时间向右（即顺时针方向）旋转的称为右旋极化波，向左（即逆时针方向）旋转的称为左旋极化波。

圆极化和线极化都是椭圆极化的特例，描述椭圆极化波的参数有 3 个：轴比——指极化椭圆长轴与短轴的比；倾角——指极化椭圆长轴与水平坐标之间的夹角；旋向——左旋或右旋。

交叉极化天线可能会在非预定的极化上辐射（或接收）不需要的极化分量能量，如辐射（或接收）水平极化波的天线，也可能辐射（或接收）不需要的垂直极化波，这种不需要的辐射极化波称为交叉极化。对线极化天线来讲，交叉极化与预定的极化方向垂直；对圆极化波来说，交叉极化与预定极化的旋向相反；对椭圆极化波来说，交叉极化与预定极化的轴比相同、长轴正交、旋向相反。所以，交叉极化又称为正交极化。

带宽。每副天线都有其中心工作频率，在偏离中心工作频率时，天线的某些电性能将会下降，电性能下降到容许值的频率范围，就称为天线的频带宽度。

天线带宽的表示方法有两种：一种是绝对带宽，它是指天线能实际工作的频率范围，即高端频率与低端频率之差；另一种是相对带宽，它是绝对带宽与中心频率之比，公式为

$$\text{天线相对带宽} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0}$$

对于天线的仿真，大家感到最难的几点是：如何设定端口和激励、该选择什么方法，由于天线的类型很多，因此在本书的第 5 章给出了不同形式天线的实现方法，并对难点问题做了详细的说明和总结，希望读者能够通过一个例子的学习掌握一类天线的实现方法。

1.3.2 雷达目标隐身[2]

考虑到天线罩的隐身特性是一项很重要的指标，故把雷达目标隐身的内容放在天线罩介绍之前来介绍。

1.2 节中的雷达距离方程清楚地说明雷达的最大探测距离与目标雷达散射截面积 σ 的四次方根成正比。有效地降低自身的 RCS 是提高自身生存能力的关键。

目标的 RCS 是度量目标对雷达波散射能力的一个物理量。对 RCS 的定义有两种观点：

一种是基于电磁散射理论的观点；另一种是基于雷达测量的观点，而两者的基本概念则是统一的，均定义为单位立体角内目标朝接收方向散射的功率与从给定方向入射于该目标的平面波功率密度值比的 4π 倍。所以，$\sigma = 4\pi R^2 \dfrac{|E_s|^2}{|E_i|^2}$。式中，$E_s$ 为空间散射电场；E_i 为入射电场，近场 RCS 可以按照该式来计算。

当距离 R 足够远时，照射目标的入射波近似为平面波，这时 σ 与 R 无关，所以，远场 RCS 的表达式为：$\sigma = 4\pi \lim\limits_{R\to\infty}(R)^2 \dfrac{|E_s|^2}{|E_i|^2}$。

RCS 与很多因素有关，如目标外形、尺寸、材料、姿态、雷达波长、极化等。根据散射体尺寸和波长 λ 的关系，散射方式可分为低频散射（瑞利区：ka<0.5）、谐振散射和高频散射；当入射波长和散射体的尺寸处于一个量级时（0.5≤ka≤20），目标处于谐振区；当入射波长远小于散射体长度时（ka>20），目标处于高频散射区（又称为光学区）。

RCS的分类方法很多种，例如，按照场区来分，有远场RCS与近场RCS，后者是距离的函数，参考前边的公式；按照入射频谱来分，有点频RCS与宽带RCS；按照雷达站接收、发射位置来分，有单站RCS、准单站RCS和双站RCS，如图 1-6 所示，在目标坐标系中，以 θ_i、φ_i代表入射波方向，θ_s、φ_s代表散射接收方向，当$\theta_i=\theta_s$、$\varphi_i=\varphi_s$ 时称其为单站（也称为单基地）散射，也称为后向散射；如果收发不用同一天线，但相互很靠近，如$|\theta_i-\theta_s|$与$|\varphi_i-\varphi_s|$均在 5°以内，则称为准单站散射；当收、发分得很开时，称为双站（双基地）散射，也称为非后向散射，发射入射波与接收散射波之间在目标坐标系中的夹角称为双站角β（双基地角）。软件仿真中只区分单站和双站。

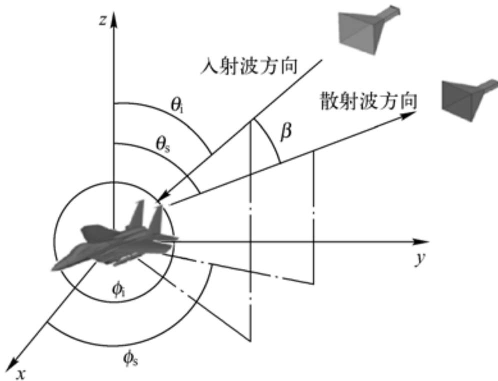


图 1-6　双站 RCS 的表示

在本书的第 9 章将详细介绍在 FEKO 中仿真金属目标体和带吸波层目标体等的实现方法。

1.3.3 天线罩[3]

天线罩又称为雷达天线罩，是保护天线免受自然环境影响的壳体结构。

天线罩是雷达系统的重要组成部分，其重要性在于为雷达天线提供了全天候的工作环

境。天线罩对天线的保护作用体现在：天线罩将天线与外界环境物理上隔离，大大降低了天线承受的载荷，简化了天线结构、驱动、阵面的设计，罩内温度均匀适中，延长了天线的使用寿命，消除了因温差带来的结构变形；在各种气候环境下，都能保证雷达天线正常工作，在特别恶劣的情况下雷达天线不被破坏，提高了天线的平均无故障时间（MTBF）。

天线罩的作用不仅在于保护天线的结构不受环境的损害，还能解决许多特殊的问题，为抗干扰和应对反辐射导弹的威胁，天线的副瓣要求控制在很低的水平，在微波频段、低副瓣和极低副瓣天线对装配加工公差要求甚严，配备天线罩后能够很好地保护天线的高精度型面，保持天线的低副瓣性能。现代天线罩在天线工作带宽内具有良好的性能，且在天线工作频带之外呈现隐身性能。

天线罩广泛应用于各个行业和系统中，如机载雷达罩、弹载雷达罩、舰载和车载天线罩等，如图 1-7 所示。



图 1-7　天线罩的应用

天线罩的分类很多种，可以按照使用场合、电尺寸大小、工作带宽等来进行分类。如果按照罩壁结构来进行分类，分为均质单层（半波长实芯壁、薄壁）天线罩、A 夹层天线罩、B 夹层天线罩、C 夹层天线罩和多夹层结构天线罩，如图 1-8 所示。

1）均质半波长实芯壁是指单层壁厚 $d=\dfrac{n\lambda}{2\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}$，式中，$\lambda$为空气波长；$\theta$为入射角；$\varepsilon$为相对介电常数；$n$ 是正整数，表示阶数，一般取 1 或 2。

2）薄壁是指壁厚远小于介质波长，小于或等于 $\lambda/(20\sqrt{\varepsilon})$，这类天线罩适合工作在波长较长频段的雷达。

3）A 夹层是由两层高密度蒙皮和低密度的中间芯层组成的。

4）B 夹层与 A 夹层相似，区别在于 B 夹层为内外两层低密度蒙皮和内层的高密度芯层。

5）C 夹层是由两个 A 夹层组成的夹层结构，具有强度高、工作频带宽等特点。

天线罩壁可采用等厚度或变厚度设计。根据环境需要，天线罩外表面有时需要涂敷防雨蚀涂层、抗静电涂层或贴防紫外线辐射薄膜，有时还要安装防雷击保护层。

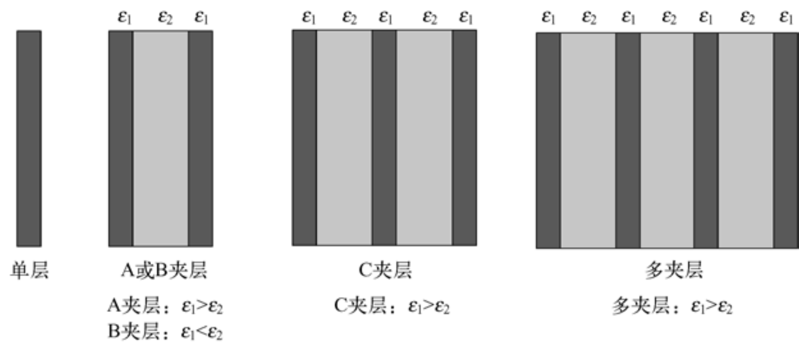


图 1-8　基本罩壁形式

天线罩的常用材料见表 1-4，其电参数包括相对介电常数（ε）和损耗角正切（$\tan\delta$）。常用天线材料的介电常数和损耗角正切见表 1-4。

表 1-4　常用天线罩材料的介电常数和损耗角正切[4]

材料名称	相对介电常数（ε）	损耗角正切（$\tan\delta$）
石英纤维/酚醛树脂	3.3～3.5	0.01～0.02
酚醛树脂复合泡沫	2.3～2.5	0.01～0.02
E-51 环氧玻璃钢	3.7～4.1	0.014～0.020
非金属蜂窝板	≤1.2	0.005
某复合泡沫板	2.3～2.6	0.015～0.020
PAPI 泡沫	≤1.2	0.005
聚四氟乙烯	2.56	-
聚甲基丙烯酸甲酯	2.66	0.01
聚合 2.5 二氯乙烯	2.57	0.0003
石英	3.8	0.0001

1．天线罩的主要透波性能参数

天线罩在保护天线的同时，给天线的电性能也带来了一定的影响，例如，加天线罩后，天线的方向性变化、增益降低、波瓣展宽、副瓣退化、产生镜像瓣、均方根（RMS）副瓣抬高、差波瓣出现不对称、指向出现非线性误差、产生交叉极化分量等。

天线罩对天线电性能的影响可用下列技术参数来表达。

1）功率传输系数：又称为传输效率，是天线罩损耗以及反射引起的主瓣峰值电平的变化。

2）瞄准误差：又称为指向误差、波束偏转，是指主瓣峰值指向角的变化，在单脉冲 PD 雷达体制中定义为差瓣零深指向角的变化。

3）波瓣宽度变化：是指加天线罩时与不加天线罩时 3dB 主瓣宽度变化的百分比。

4）副瓣抬高：是指天线罩引起的天线副瓣抬高。

5）反射瓣：是由天线罩罩壁反射而产生的波瓣。反射瓣方向与主瓣方向是关于天线罩镜像对称的，所以又称为镜像瓣。反射瓣在雷达显示屏出现闪烁的假目标，所以又称为闪烁瓣。

6）交叉极化电平：是指天线罩产生的与天线主极化正交的极化分量电平。

7）瞄准误差率：又称为波束偏转率，是指天线在天线罩内扫描角变化对应的瞄准误差的变化。火控雷达天线罩瞄准误差率小于 1mrad/(°)，即扫描角变化 1°时，瞄准误差的变化

小于 1mrad。过大的瞄准误差会造成跟踪失稳，导致脱靶。

不同类型的天线罩，由于工作的环境不同，所以对天线罩的电性能指标的设计要求也不同。

1）通用微波雷达天线罩：重点在于高的功率传输系数，对带宽和反射要求一般，常用于搜索雷达天线。

例如：对于鼻锥机头罩，在 X 波段，功率传输系数最小值为 75%，平均值为 85%；对于蛋卵机头罩和导弹天线罩，在 X 波段，最小值为 85%，平均值为 90%。

2）引导雷达天线罩：强调低的瞄准误差或小的波束偏移，根据实际情况可适度降低传输效率的要求，对带宽和反射系数要求不严格，如导弹天线罩。

例如：对于鼻锥机头罩和蛋卵机头罩，在 X 波段，瞄准误差的典型值为 2～5 (mrad)，瞄准误差率为 0.5～1(mrad/(°))；对于导弹天线罩，在 X 波段，瞄准误差的典型值为 2～5 (mrad)，瞄准误差率为 0.4～1(mrad/(°))。

3）宽带雷达天线罩：设计要点在于保证足够带宽的前提下有适中的传输效率、低反射及足够的指向精度。最常见的就是电子支援侦察（ESM）天线罩、干扰机天线罩等。

4）低副瓣天线罩：强调维持原天线的极低副瓣性能指标，对传输效率、带宽要求适中，如机载 PD 雷达天线罩、机载预警和控制系统（AWACS）的雷达天线罩。

2．基于FSS结构的天线罩隐身设计

飞机（也适用于导弹或军舰等平台）的散射截面主要受平台外形技术和隐身材料技术影响。而雷达舱的隐身非常复杂，原因是雷达舱的前端要为天线辐射阵面保留射频的窗口，而雷达天线作用距离要有一定尺寸的口径，辐射口径的镜面反射使得雷达天线系统在飞机头部鼻锥方向产生很强的电磁散射，降低天线雷达散射截面的主要方法是斜置天线和设计低 RCS 天线。图 1-9 所示描述了斜置天线改变雷达回波方向降低 RCS 的原理。设计低 RCS 天线存在很多技术难题，要求天线 RCS 的模式项和结构项都在宽频带全匹配是十分困难的，需要采用隐身天线罩技术来降低天线带外的 RCS。

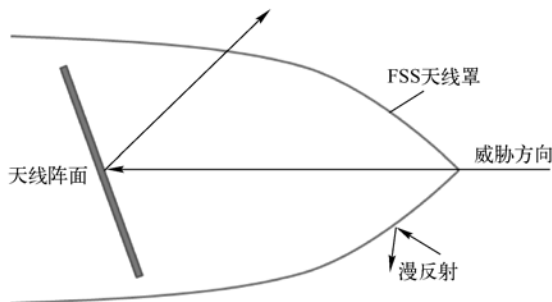


图 1-9　天线与天线罩的散射

FSS 是一种由谐振单元按照二维周期性排列构成的单层或多层的平面或立体结构，它对电磁波具有频率选择特性，其单元分为周期性金属贴片和周期孔径两种类型。FSS 基本单元形状有偶极子、耶路撒冷、十字、方环、圆环、Y 形等。FSS 与滤波器的特性非常相似，有高通、低通、带通、带阻特性。

在雷达前加一个频率选择天线罩，天线罩在雷达频段内透过，在雷达频段外反射。加

FSS 天线罩后，雷达频段外天线的镜面反射被避免了，而雷达天线罩的外表面仅产生漫反射，降低了来波方向上的散射。

本书的第 6 章将详细介绍在 FEKO 中如何进行材料的设计和 FSS 结构的透波分析，以及天线罩透波特性、瞄准误差分析的工程实现。关于目标体的隐身分析，可以参考第 9 章的内容。

1.3.4 电磁兼容

电磁兼容即 EMC 是 electromagnetic compatibility 的缩写，国际电工委员会标准（IEC）对电磁兼容的定义为："系统或设备在所处的电磁环境中能正常工作，同时不会对其他系统和设备造成干扰"。在国家标准 GB/T 4365—2003《电工术语电磁兼容》中对电磁兼容所下的定义为："设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力"。电磁兼容是研究在特定的空间、特定的时间和频谱条件下，各种用电设备可以共存并不致引起降级的一门学科。

根据电磁兼容的定义，EMC 包括电磁干扰（EMI）和电磁敏感度（EMS），包括两个方面的要求：一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁干扰不能超过一定的限值；另一方面是指设备或系统对所在环境中存在的电磁干扰具有一定程度的抗扰度，即电磁敏感性。工程上，根据电磁兼容问题的特点，在实验室测试时，又细分为辐射发射（RE）、辐射敏感度（RS）、传导发射（CE）和传导敏感度（CS）。

系统要发生电磁兼容性问题，必须存在 3 个因素，即电磁骚扰源、耦合途径、敏感设备。所以，在遇到电磁兼容问题时，要从这 3 个因素入手，对症下药，消除其中一个因素，就能解决电磁兼容问题。要进行电磁兼容的仿真，必须给定明确的骚扰源和敏感设备及其限值等。

当系统存在电磁兼容的风险时，在整改中常用的措施包括接地、滤波和屏蔽等。对于复杂的系统，往往很难做到定量的 EMC 仿真，这主要体现在骚扰源的复杂度和系统的结构复杂度，但是，采取措施前后对性能的改进量往往是可以精确衡量的，这在工程上就非常有价值。

对于机载（见图 1-10）、弹载、舰载、车载或星载等多天线系统，由于收发天线并存，天线之间存在工作频段重叠，因此提高天线之间的隔离度有助于提高整个系统的 EMC 性能。

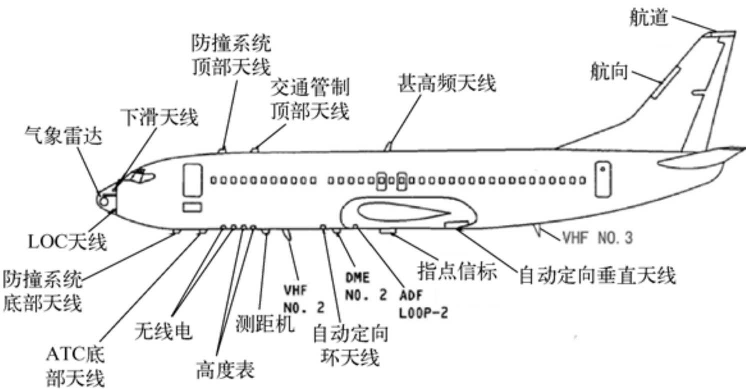


图 1-10　机载多天线系统

关于电磁兼容问题的仿真，建议参考本书第 7 章、第 8 章和第 10 章的内容，了解和掌握天线布局、线缆 EMC 以及机箱屏蔽等典型 EMC 问题的仿真流程。

1.3.5 电波传播

电波传播是所有无线电收发系统之间信息传输的基础，是电子系统的重要组成部分，而电波传播模型的研究也是电子系统工程的重要基础之一。

地球表面及大气层是影响无线电传播的两个主要因素。在不同的波段内的无线电波具有不同的传播特性，主要的传播模式包括：波导传播、地波/天波传播、空间波/绕射/对流层散射传播、视距传播等，如图 1-11 所示。

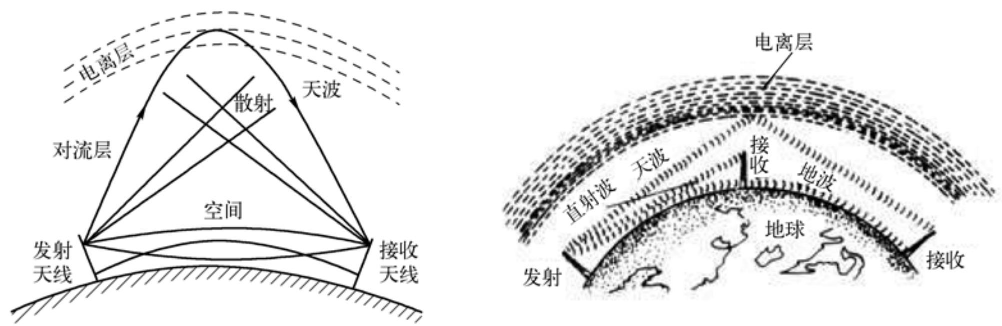


图 1-11　无线电波的传播途径

电波传播模型是指无线电波在空间传播过程中物理特征所形成的模式，指特定远场区域中的电波传播模型，具体见表 1-5，利用这些传播模型可以更好地理解电波的空间传播特性，并定量计算其传播参数和预测场强值。

表 1-5　电波传播模型汇总

<table>
<tr><th colspan="6">传播模型</th><th>主要适用频段</th></tr>
<tr><td colspan="6">自由空间传播模型</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">波导传播模型</td><td>3～30 kHz</td></tr>
<tr><td colspan="6">地波传播模型</td><td>3kHz～30 MHz</td></tr>
<tr><td colspan="6">低于 150 kHz 天波传播模型</td><td>< 150 kHz</td></tr>
<tr><td colspan="6">150～1700 kHz 天波传播模型</td><td>150～1700 kHz</td></tr>
<tr><td colspan="6">1600 kHz～30 MHz 天波传播模型</td><td>1600 kHz～30 MHz</td></tr>
<tr><td rowspan="6">地面固定/移动传播模型</td><td rowspan="6">确定模型</td><td colspan="3">视距传播</td><td>视距传播模型</td><td>>30 MHz</td></tr>
<tr><td colspan="3">空间波传播</td><td>空间波传播模型</td><td>30MHz～30 GHz</td></tr>
<tr><td rowspan="4">绕射传播</td><td colspan="2">子路径绕射</td><td>子路径绕射传播模型</td><td>30MHz～30 GHz</td></tr>
<tr><td colspan="2">光滑地面绕射</td><td>光滑地面绕射传播模型</td><td>30MHz～30 GHz</td></tr>
<tr><td rowspan="2">障碍绕射</td><td>刃形障碍绕射</td><td>刃形障碍绕射传播模型</td><td>30MHz～30 GHz</td></tr>
<tr><td>柱形障碍绕射</td><td>柱形障碍绕射传播模型</td><td>30MHz～30 GHz</td></tr>
</table>

（续）

传播模型				主要适用频段
地面固定/移动传播模型	确定模型	对流层波导传播	对流层波导传播模型	500 MHz～50 GHz
		对流层散射传播	对流层散射传播模型	100 MHz～10 GHz
	经验半经验模型		Egli 模型 Lee 模型	40～400 MHz
			GB/T 14617.1-2012 模型	30 MHz～3 GHz
			Okumura-Hata 模型 Okumura 模型	100 MHz～3 GHz
			Rec.ITU-R P.1546 模型	30 MHz～3 GHz
航空移动和导航传播模型				125 MHz～15.5 GHz
地空固定传播模型				1～55 GHz
地空陆地移动传播模型				0.85～20 GHz
地空海事移动传播模型				0.8～20 GHz
地空航空移动传播模型				1～2 GHz

Altair 公司提供专业的可用于电波传播和网络规划的行业标准工具 WinProp，该工具提供了丰富的电波传播模型，包括经验双向射线模型（Empirical Two-Ray Model）、确定性双射线模型（Deterministic Two Ray Model）、Hata-Okumura 模型、ITU P1546 Broadcasting 模型、野外优势路径模型（Rural Dominant Path Model）、COST231 WI 模型、刀刃衍射模型（Knife Edge Diffraction Model）、2×2D 智能射线跟踪模型、城市优势路径模型等，可以适用于室内/室外、城市/郊区、野外/山区、隧道/地下交通、汽车交通等不同的应用场景。这一部分应用不属于本书范畴，所以不做详细介绍，要了解该产品的详细信息可以登录网站 http://www.altairhyperworks.com.cn/product/winprop，或直接拨打售后服务电话（4006-196-186）。

1.4 电磁理论基础

无论在哪个应用领域，射频和微波工程师所要解决的核心工程问题都是基于一定的激励源和边界条件下的麦克斯韦（Maxwell）方程组的求解问题。

一个电磁问题的确定性矢量偏微分方程组应由三部分组成：麦克斯韦方程组、介质本构关系和求解域边界条件。

1.4.1 麦克斯韦方程组[5]

麦克斯韦在安培、法拉第等人的基础上，通过引入位移电流，建立了完整表达电磁规律的方程组，即

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \quad \text{（法拉第定律）} \tag{1-1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \quad \text{（安培定律）} \tag{1-2}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \quad \text{（电位移高斯定律）} \tag{1-3}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \text{（磁感应高斯定律）} \tag{1-4}$$

式中，$\boldsymbol{E}$ 为电场强度（$V \cdot m^{-1}$）；$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量($C \cdot m^{-2}$)；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度($A \cdot m^{-1}$)；$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度（$Wb \cdot m^{-2}$）；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度（$A \cdot m^{-2}$）；ρ 为电荷密度（$C \cdot m^{-3}$）。

由电荷守恒定律可以写出电流连续性方程

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{1-5}$$

上述 5 个方程只有 3 个是独立的。对于时变电流，时变等效电流或时变等效磁流产生的电磁场问题，往往采用式（1–1）和式（1–2）两个方程，因为其他方程并不能为求解 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{B}$ 提供帮助。很显然，这些方程并不足以确定 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{B}$ 这些未知物理量。以电磁场为例，矢量方程式（1–1）和式（1–2）只能给出 6 个标量方程，远不足以确定所含的 12 个未知标量，因此要确定未知量，还必须提供其他关系，即介质本构关系：$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$ 的关系，$\boldsymbol{J}$ 和 $\boldsymbol{E}$ 的关系。

1.4.2 介质本构关系

介质本构关系通常由试验确定或根据介质的微观结构推导而得，一般来说，对于很多介质，它们的本构关系可以写成

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} \tag{1-6}$$

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} \tag{1-7}$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \tag{1-8}$$

式中，ε、μ、σ是材料参数，分别称为介电常数（$F \cdot m^{-1}$）、磁导率（$H \cdot m^{-1}$）和电导率（$S \cdot m^{-1}$）。

如果介质中这些本构参数随空间位置而变，则此材料介质称为非均匀介质，反之为均匀介质；如果介质这些本构参数是频率的函数，则此类介质称为色散介质；如果介质中这些本构参数是张量形式，则此类介质称为各向异性介质。

1.4.3 求解域的边界条件

有了描述电磁规律的麦克斯韦方程组以及反映介质特征的本构关系，还不足以确定电磁场。要确定电磁场，还须给出求解域的边界条件。边界条件多种多样，因问题而异。

在电磁领域中，很多闭域问题的求解域边界都是金属，如腔体本征值问题、金属体的散射问题等。如果视金属为理想电导体，那么此类问题的边界条件就可以写成

$$\hat{\boldsymbol{n}} \times \boldsymbol{E} = 0 \tag{1-9}$$

或

$$\hat{\boldsymbol{n}} \times \nabla \times \boldsymbol{H} = 0 \tag{1-10}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{n}}$ 是边界的单位法向矢量。数学上常称式（1–9）为第一类边界条件（Dirichlet），其特征是未知量在边界为已知固定值；式（1–10）为第二类边界条件（Neumann），其特征是未知量的导数在边界为已知固定值。

与闭合问题不同，开域问题（如辐射和散射问题）的边界条件通常不能写成第一或第二类边界条件，而是第三类边界条件。这类边界的特征为未知量和未知量的导数在边界有确定的关系。

1.4.4 阻抗边界条件

在实际遇到的电磁散射问题中，散射体往往是非完纯导体，而是吸波材料涂覆的导体或粗糙面的导体。在求解这样的问题时，发现使用近似边界条件是方便的，称这些边界条件为阻抗边界条件（Impedance Boundary Condition，IBC），IBC 可以表示为

$$\hat{\boldsymbol{n}}\times(\hat{\boldsymbol{n}}\times\boldsymbol{E}) = -Z_{\mathrm{s}}(\hat{\boldsymbol{n}}\times\boldsymbol{H})$$

式中，$\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 分别为周围介质内的电、磁场强度；Z_{s}为散射体的表面阻抗，定义为表面 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 的切向分量之比。

本书涉及射频和微波工程师所关心的各类问题，第 2 章将详细介绍工程上常用的电磁计算方法，第 5～10 章，通过详细的案例操作，帮助读者真正掌握 FEKO 软件，并在工程中发挥最大的作用。

本章参考文献

[1] 林昌禄，聂在平. 天线工程手册[M]. 北京：电子工业出版社，2014.
[2] 黄培康，殷红成，许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京：电子工业出版社，2005.
[3] 张强. 天线罩理论与设计方法[M]. 北京：国防工业出版社，2014.
[4] 朱全忠. 谈谈天线罩透波壁的理论厚度和结构厚度[J]. 飞航导弹，2004(2): 62.
[5] 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 北京：中国科学技术大学出版社，2008.

第 2 章

电磁场数值计算方法



电磁场计算方法主要有高频近似方法、数值方法和混合方法等。其中数值方法有两大类，一类是以电磁场积分方程为基础的数值方法，如矩量法（MOM）系列，另一类是以电磁场微分方程为基础的数值方法，如有限元（FEM）方法等。FEKO 软件以矩量法（MOM）为基础，采用多层快速多极子方法（MLFMM），在保证精度的前提下大大提高了计算规模及计算效率。另外，FEKO 还支持有限元及时域有限差分（FDTD）等方法。同时，FEKO 包括多种高频近似方法以及各类混合算法。本章详细介绍 FEKO 软件中的各类电磁场数值计算方法。

2.1　矩量法（Method of Moments）的原理与实现

2.2　多层快速多极子（MLFMM）的原理与实现

2.3　有限元（FEM）的原理

2.4　时域有限差分（FDTD）

2.5　高频近似方法

2.6　主要的混合方法

2.1 矩量法（Method of Moments）的原理与实现

矩量法自 Roger F. Harrington 于 1968 年提出以来，就广泛用于各种天线辐射、复杂散射体散射以及静态或准静态等问题的求解。矩量法是一种严格的数值方法，其精度主要取决于目标几何建模精度和正确的基，权函数选择以及阻抗元素的计算等。FEKO 采用 RWG 基函数并支持高阶叠层基函数（Hierarchical basis functions）的高阶矩量法。下面详细介绍矩量法的原理与实现方法。

2.1.1 矩量法的原理与实现

1．矩量法的基本原理

矩量法是指将算子方程化为矩阵方程，然后求解该矩阵方程的方法。例如，描述物理系统的算子方程为

$$L(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{b} \tag{2-1}$$

式中，$\boldsymbol{x}$ 为未知等效流或场；$\boldsymbol{b}$ 为已知激励源。用矩量法求解该算子方程的步骤如下：

1）选择一组带有未知数的基函数 $\{\boldsymbol{j_i}\}_{i=1}^{N}$ 表示未知等效流或场，即 $\boldsymbol{x}=\sum\limits_{i=1}^{N}a_i\boldsymbol{j}_i$。

2）选择加权函数或检验函数 $\boldsymbol{t}_j$，并对算子方程两边求内积得

$$<\boldsymbol{t_j},L(\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{N}}a_i\boldsymbol{j}_i)>=<\boldsymbol{t_j},\boldsymbol{b}> \tag{2-2}$$

式（2-1）进一步写为 $\sum\limits_{i=1}^{N}A_{ji}a_i=\sum\limits_{i=1}^{N}<\boldsymbol{t_j},L(\boldsymbol{j_i})>a_i=<\boldsymbol{t_j},\boldsymbol{b}>=f_j$，或写为矩阵形式 $[A][a]=[f]$。

3）用直接法或迭代法求解这一矩阵方程 $[A][a]=[f]$，从而获得等效流或场的未知数向量 $[a]$。

4）由求得的等效流代入积分方程求解任意点的场。

用矩量法求解电磁场问题的优点是严格地计算各子散射体间的互耦，矩量法本身保证了计算误差的系统总体最小而不会产生数值色散问题。因为由矩量法离散获得的矩阵一般为满阵，所以阻抗矩阵的存储量为 $O(N^2)$，直接求解和迭代求解矩阵方程的计算复杂度为 $O(N^3)$ 和 $O(N^2)$，当问题的电尺寸变得很大时，其存储量和计算量将会很大。随着计算机性能的飞速提高和计算数学的发展，以矩量法为基础的一些高效方法，如多层快速多极子方法（MLFMM），在保证精度的同时极大地减少了计算时间和内存需求，因此矩量法及其快速算法已经在工程中得到了广泛应用。

2．RWG基函数，伽略金方法

RWG 基函数是 Rao，Wilton，Glisson 于 1982 年提出的定义在相邻平面三角贴片上的基函数，又称为广义屋脊基函数，其简单示意图如图 2-1 所示。通常，选择权函数与基函数形式一样，即采用伽略金方法。这种基、权函数能较好地模拟散射体表面感应电流分布，不会

造成人为电荷的堆积，保证了电流的连续性。由于平面三角贴片能灵活模拟任意复杂的三维几何形体，如尖点、凹槽及目标表面的凸起物，因此平面三角贴片和 RWG 基函数在复杂形体目标的电磁散射分析中广泛应用。

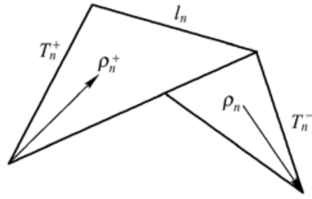


图 2-1　平面三角贴片和 RWG 基函数

RWG 基函数的定义式为

$$\boldsymbol{f}_n(\boldsymbol{r})=\begin{cases}\dfrac{l_n}{2A_n^+}\boldsymbol{\rho}_n^+ & \boldsymbol{r}\in T_n^+\\ \dfrac{l_n}{2A_n^-}\boldsymbol{\rho}_n^- & \boldsymbol{r}\in T_n^-\\ 0 & \boldsymbol{r}\in \text{其他}\end{cases} \tag{2-3}$$

式中，T_n^+、T_n^- 为第 n 个基函数所对应的两个相邻三角形；l_n 为公共边长度；A_n^+、A_n^- 分别为三角形 T_n^+、T_n^- 的面积；ρ_n^+、ρ_n^- 分别为三角形 T_n^+ 的顶点指向该三角形的场点和三角形 T_n^- 上的场点指向该三角形顶点的矢量。由式（2-3）可得到基函数 $f_n(\boldsymbol{r})$ 的散度。可以看出，在 T_n^+、T_n^- 上电荷密度均匀，两相邻三角形的总电荷为零，没有线电荷的堆积，这样保证了相邻三角形单元两边电流的连续性。

$$\nabla\cdot\boldsymbol{f}_n(\boldsymbol{r})=\begin{cases}\dfrac{l_n}{A_n^+} & \boldsymbol{r}\in T_n^+\\ -\dfrac{l_n}{A_n^-} & \boldsymbol{r}\in T_n^-\\ 0 & \boldsymbol{r}\in \text{其他}\end{cases} \tag{2-4}$$

考虑由标量位和矢量位构成的导体的电场积分方程，采用平面三角形贴片、RWG 基函数、伽略金方法的阻抗元素计算。

$$-\boldsymbol{E}_{\tan}^i(\boldsymbol{r})=\left(iw\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r})-\nabla\phi(\boldsymbol{r})\right)_{\tan},\quad \boldsymbol{r}\ \text{在导体边界面上} \tag{2-5}$$

对于伽略金方法，权函数与基函数相同，在式（2-5）两边取权函数 f_m 作内积，得到

$$<\boldsymbol{E}^i,\boldsymbol{f}_m>=-iw<\boldsymbol{A},\boldsymbol{f}_m>+<\nabla\phi,\boldsymbol{f}_m> \tag{2-6}$$

利用矢量运算公式与 ϕ 在三角形上面积分的几何重心近似，最终可得到

$$<\nabla\phi, \boldsymbol{f}_m> = -\int_s \phi\nabla_s \cdot \boldsymbol{f}_m \mathrm{d}s \approx l_m\left[\phi\left(\boldsymbol{r}_m^{c+}\right)-\phi\left(\boldsymbol{r}_m^{c-}\right)\right] \tag{2-7}$$

式中，$\boldsymbol{r}_m^{c+}$、$\boldsymbol{r}_m^{c-}$ 分别为权函数 $\boldsymbol{f}_m$ 所对应的三角形 T_m^+、T_m^- 几何重心的场矢量。

同理，利用几何重心近似，可得

$$<\begin{Bmatrix}\boldsymbol{E}^i\\ \boldsymbol{A}\end{Bmatrix}, \boldsymbol{f}_m> = \frac{l_m}{2}\left[\begin{Bmatrix}\boldsymbol{E}^i\left(\boldsymbol{r}_m^{c+}\right)\\ \boldsymbol{A}\left(\boldsymbol{r}_m^{c+}\right)\end{Bmatrix}\cdot\boldsymbol{\rho}_m^{c+} + \begin{Bmatrix}\boldsymbol{E}^i\left(\boldsymbol{r}_m^{c-}\right)\\ \boldsymbol{A}\left(\boldsymbol{r}_m^{c-}\right)\end{Bmatrix}\cdot\boldsymbol{\rho}_m^{c-}\right] \tag{2-8}$$

式中，$\boldsymbol{\rho}_m^{c+}$ 为三角形顶点流出到点 $\boldsymbol{r}_m^{c+}$ 的矢量；$\boldsymbol{\rho}_m^{c-}$ 为从点 $\boldsymbol{r}_m^{c-}$ 流入到三角形顶点的矢量。将导体表面感应电流用基函数展开，式（2–6）则可写成如下矩阵方程的形式

$$\bar{\boldsymbol{Z}}\cdot\boldsymbol{I} = \boldsymbol{V} \tag{2-9}$$

$$Z_{mn} = l_m\left[-iw\left(\boldsymbol{A}_{mn}^+\cdot\frac{\boldsymbol{\rho}_m^{c+}}{2} + \boldsymbol{A}_{mn}^-\cdot\frac{\rho_m^{c-}}{2}\right) + \left(\phi_{mn}^- - \phi_{mn}^+\right)\right] \tag{2-10}$$

$$V_m = l_m\left(\boldsymbol{E}_m^{i+}\cdot\frac{\rho_m^{c+}}{2} + \boldsymbol{E}_m^{i-}\cdot\frac{\rho_m^{c-}}{2}\right) \tag{2-11}$$

式中，$\boldsymbol{I}$ 为待求电流矢量；$\boldsymbol{A}_{mn}^{\pm}$ 为基函数 $\boldsymbol{f}_n$ 在权函数对应的三角形重心 $\boldsymbol{r}_m^{c\pm}$ 处产生的矢量位；$\phi_{mn}^{\pm}$ 为基函数 $\boldsymbol{f}_n$ 在权函数对应的三角形重心 $\boldsymbol{r}_m^{c\pm}$ 处产生的标量位。具体表达为

$$\boldsymbol{A}_{mn}^{\pm} = \frac{u_0}{4\pi}\int_s \boldsymbol{f}_n\left(\boldsymbol{r}'\right)\frac{\exp\left(ikR_m^{\pm}\right)}{R_m^{\pm}}\mathrm{d}s' \tag{2-12}$$

$$\phi_{mn}^{\pm} = \frac{1}{4\pi iw\varepsilon}\int_s \nabla_s'\cdot\boldsymbol{f}_n\left(\boldsymbol{r}'\right)\frac{\exp\left(ikR_m^{\pm}\right)}{R_m^{\pm}}\mathrm{d}s' \tag{2-13}$$

$$R_m^{\pm} = \left|\boldsymbol{r}_m^{c\pm} - \boldsymbol{r}'\right| \tag{2-14}$$

传统阻抗元素计算方法是对应于每一个基函数和权函数而言的。对于 RWG 基函数每个三角形（边缘三角形除外）均对应于 3 个基函数和 3 个权函数。这意味着采用传统阻抗元素计算方法时，对给定的一个场三角形和一个源三角形，共有 9 个阻抗元素与之对应，所以在该源三角形上的面积分要计算 9 次。当三角形贴片数量很多时，阻抗元素的计算效率将很低。为高效计算阻抗元素，可以采用平面三角对组合计算（face–pair combination）来代替传统的阻抗元素计算方法。平面三角对组合计算针对给定的一个场三角形、一个源三角形开展。对给定的场三角形、源三角形，在源三角形上的面积分只计算 3 次，因此大大提高了阻抗元素的计算效率。图 2–2 所示表示出了在全局坐标系中任意的一个场点三角形 T^p 与源点三角形 T^q 的几何关系。其中，$\boldsymbol{r}_1$、$\boldsymbol{r}_2$、$\boldsymbol{r}_3$ 分别为源三角形 T^q 的 3 个顶点矢径，$\boldsymbol{r}^{cp}$ 为场点三角形 T^p 的几何重心矢径。

对照图 2–2 所给的几何关系，令 $\boldsymbol{\rho}_i = \pm\left(\boldsymbol{r}' - \boldsymbol{r}_i\right)$，$i = 1,2,3$；$\pm$ 号的选择取决于感应电流从三角形顶点流出还是流入三角形顶点。因为每一个三角形对应于 3 个基函数，它们分别对应于矢量 $\boldsymbol{\rho}_i, i = 1,2,3$。定义 $\boldsymbol{A}_i^{pq}$ 为源点三角形 T^q 在感应电流沿 $\boldsymbol{\rho}_i$ 方向时在场点三角形 T^p 的重心 $\boldsymbol{r}^{cp}$ 处产生的矢量位；ϕ_i^{pq} 为源点三角形 T^q 在场点三角形 T^p 的重心 $\boldsymbol{r}^{cp}$ 处产生的标量位。表达式为

$$\boldsymbol{A}_i^{pq} = \frac{u_0}{4\pi}\int_{T^q}\left(\frac{l_i}{2A^q}\right)\boldsymbol{\rho}_i \frac{\exp\left(ikR^p\right)}{R^p}\mathrm{d}s' \tag{2-15}$$

$$\phi_i^{pq} = \pm\frac{1}{4\pi iw\varepsilon}\int_{T^q}\left(\frac{l_i}{A^q}\right)\frac{\exp\left(ikR^p\right)}{R^p}\mathrm{d}s' \tag{2-16}$$

$$R^p = \left|\boldsymbol{r}^{cp} - \boldsymbol{r}'\right| \tag{2-17}$$

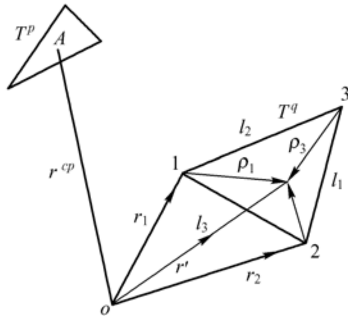


图 2-2　全局坐标系中的场点三角形和源点三角形示意图

为方便三角形面积分建立以源三角形 T^q 的顶点 1 为坐标中心的局部坐标系，要求该三角形顶点 1、2、3 逆时针排列，如图 2-3 所示。定义归一化面积坐标变量：ξ、η、ς，定义如下

$$\xi = A_3 / A_q = N_3，\quad \eta = A_2 / A_q = N_2，\quad \varsigma = A_1 / A_q = N_1 \tag{2-18}$$

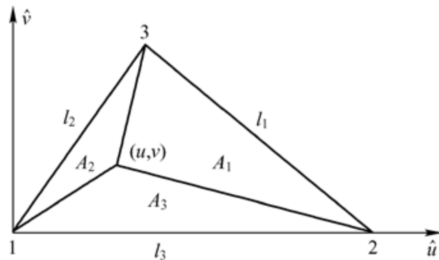


图 2-3　局部坐标系中的三角形，顶点 1、2、3 逆时针排列

对应于图 2-3 中三角形上的任一点 $\boldsymbol{r}'$ 均可用该三角形的顶点坐标 $\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2, \boldsymbol{r}_3$ 表示为

$$\boldsymbol{r}' = \varsigma\ \boldsymbol{r}_1 + \eta\ \boldsymbol{r}_2 + \xi\ \boldsymbol{r}_3 = N_1\ \boldsymbol{r}_1 + N_2\ \boldsymbol{r}_2 + N_3\ \boldsymbol{r}_3 \tag{2-19}$$

利用 $\boldsymbol{\rho}_i = \pm\left(\boldsymbol{r}' - \boldsymbol{r}_i\right)$，$i = 1,2,3$ 和式（2-19），可以得到

$$\boldsymbol{A}_i^{pq} = \pm\frac{u_0}{4\pi}\left(\boldsymbol{r}_1 I_\varsigma^{pq} + \boldsymbol{r}_2 I_\eta^{pq} + \boldsymbol{r}_3 I_\xi^{pq} - \boldsymbol{r}_i I^{pq}\right) \tag{2-20}$$

$$\phi_i^{pq} = \pm\frac{l_i}{i2\pi w\varepsilon} I^{pq} \tag{2-21}$$

其中：

$$I_{\xi}^{pq}=\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}N_{3}\frac{\exp\left(ikR^{p}\right)}{R^{p}}\mathrm{d}T \tag{2-22}$$

$$I_{\eta}^{pq}=\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}N_{2}\frac{\exp\left(ikR^{p}\right)}{R^{p}}\mathrm{d}T \tag{2-23}$$

$$I^{pq}=\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}\frac{\exp\left(ikR^{p}\right)}{R^{p}}\mathrm{d}T \tag{2-24}$$

$$I_{\varsigma}^{pq}=I^{pq}-I_{\xi}^{pq}-I_{\eta}^{pq} \tag{2-25}$$

由此，阻抗元素的计算便归结为上式的计算。由此可见，利用平面三角对组合方法只需求出 3 个积分 I^{pq}、I_{ξ}^{pq}、I_{η}^{pq}，便可方便地求出该三角形所对应的 3 个基函数单元的积分值。对于 I^{pq}、I_{ξ}^{pq}、I_{η}^{pq}，可利用 Rogrila 的方法进行计算。

当 $p\neq q$ 时，场点在源三角形外，式（2–22）～式（2–25）积分无奇异性，可用高斯积分计算，计算式如下

$$\begin{aligned}I_{\xi}^{pq}&=\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}N_{3}\frac{\exp\left(ikR^{p}\right)}{R^{p}}\mathrm{d}T=\int_{0}^{1}\int_{0}^{1-\eta}\xi\frac{\exp\left(ikR^{p}\right)}{R^{p}}\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\\&=\sum_{i=1}^{n}w_{i}f\left(\xi_{i},\eta_{i}\right)\end{aligned} \tag{2-26}$$

式中，n 为高斯积分点数；w_i 为权系数；函数 $f\left(\xi,\eta\right)=\xi\dfrac{\exp\left(ikR^{p}\right)}{R^{p}}$。关于权系数 w_i、结点 $\left(\xi_i,\eta_i\right)$ 可采用九点等权高斯积分或七点不等权高斯积分计算。I^{pq},I_{η}^{pq} 计算类似。

当 $p=q$ 时，场点在源三角形内，式（2–22）～式（2–25）积分有奇异性，必须用加减奇异项的方法处理。首先考虑式（2–24）的计算。

$$I^{pq}=\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}\frac{\exp\left(ikR^{p}\right)-1}{R^{p}}\mathrm{d}T+\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}\frac{1}{R^{p}}\mathrm{d}T=I_{\text{num}}+I_{\text{anl}} \tag{2-27}$$

$$I_{\text{anl}}=\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}\frac{1}{R^{p}}\mathrm{d}T \tag{2-28}$$

$$I_{\text{num}}=\frac{1}{2A^{q}}\int_{T^{q}}\frac{\exp\left(ikR^{p}\right)-1}{R^{p}}\mathrm{d}T \tag{2-29}$$

式（2–29）的计算用高斯积分易于计算，因为积分核已连续变化，并无奇异性。式（2–28）的积分有解析结果。

3．线性方程组的求解

通过矩量法把表面积分方程离散化为阻抗矩阵方程后，面临的问题是如何求解这一满阵的矩阵方程。对阻抗矩阵方程的数值求解有直接法和迭代法之分。直接方法的好处是对于小阶数矩阵的求解快速准确。但是当矩阵阶数增加时，计算复杂性随阶数的立方次增加。而好

的迭代法的计算复杂度则是矩阵阶数的平方。因此，迭代求解法更能高效地求解阻抗矩阵方程。

（1）直接求解方法

直接方法的理论基础比较成熟。常用的直接法有高斯消元，LU 分解求逆，SVD 分解求逆等。由于 LU 分解所生成的逆矩阵刚好覆盖原矩阵，是一种节约内存的方法，因此 LU 分解是最常用的直接求逆方法。SVD 分解求逆主要用于求解矩阵的广义逆，这适用于对病态矩阵或矩阵秩小于矩阵阶数的矩阵进行求逆。

（2）迭代求解法

当矩阵的阶数很大时，在给定的计算条件下用直接求逆求解矩阵方程将变得十分费时。所以需要寻求一种不用求逆的矩阵方程求解方案，这就是迭代法。常用的迭代法有：雅可比迭代法、高斯−塞德尔迭代法、超松弛迭代法、共轭梯度法及其改进、双共轭梯度法等。

2.1.2 典型应用

矩量法是一种全波技术求解频域麦克斯韦方程组积分形式的经典算法。矩量法也被称为“源”的求解算法，相对于“场”的求解算法，矩量法只需要离散几何模型而无须离散空间，无须设置边界条件，其计算量只取决于计算频率及模型的几何尺寸。矩量法适合计算各类电磁辐射和电磁散射问题。下面介绍 FEKO 软件中矩量法的特点。

1．采用格林函数计算平面分层结构

FEKO 支持采用格林函数（Green's functions）计算二维无限大平面分层介质（有限厚度）问题，如图 2−4 所示。软件支持金属体及金属线模型嵌入到分层介质中，支持任意外形及穿越多层介质的结构体。另外，也支持任意形状的介质体嵌入在分层介质中。仿真时只需要网格离散金属体/线及介质体结构，无须离散多层介质结构，该方法可用于快速评估各类微带结构（考虑无限大介质情况）。

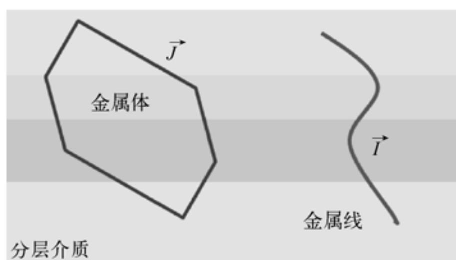


图 2−4　格林函数方法计算平面分层介质问题

2．面等效（SEP）方法计算介质

面等效方法是在封闭介质体表面引入等效的电流源和磁流源。FEKO 默认采用 SEP 方法计算介质体，该方法采用三角形网格剖分。

3．体等效（VEP）方法计算介质

体等效方法是采用四面体网格离散任意形状的介质体，该方法较 SEP 采用更多的基函数，且允许每个单元的介质材料不同。

4．汽车风窗天线

汽车车窗天线通常要考虑玻璃的多层介质特性。FEKO 的风窗天线分析技术只需要剖分天线单元，玻璃的多层介质特性采用特殊的方法严格考虑。同时，该技术支持采用多层快速多极子加速计算。

5．薄介质结构（Thin Dielectric Sheets）

薄的多层介质结构以及各向异性介质材料可等效为无厚度的介质面，该技术可用于天线罩仿真以及车窗天线仿真。

6．薄介质涂层的金属线

FEKO 应用下面两种方法计算金属线的电介质和磁性材料涂层问题：

1）采用 Popovic's 方程修改金属线的半径以改变容性负载，同时增加感性负载。该方法要求涂层的损耗因子与金属线所在的媒质的损耗因子相等。

2）当对于涂层的相对介电常数与金属线所在的媒质相同时，应用等效理论计算体极化电流。该方法不支持磁性材料涂层。

7．理想地平面

FEKO 中的理想地平面（无限大）可采用反射系数近似计算，也支持采用精确的 Sommerfeld 积分方程计算。

8．周期性边界条件

FEKO 支持一维与二维周期性无限大结构计算。

9．低频问题求解

FEKO 通过特殊基函数支持极低频问题，求解低频问题时需要打开开关“Active low frequency stabilization for MoM”。

2.2 多层快速多极子（MLFMM）的原理与实现

2.2.1 多层快速多极子的原理与实现

快速多极子方法（FMM）的数学基础是矢量加法定理，即利用加法定理对积分方程中的格林函数在角谱空间中展开，利用平面波进行算子对角化，最终将密集阵与矢量的相乘计算转化为几个稀疏阵与该矢量的相乘计算，如图 2-5 所示。

图 2-5 分解密集矩阵为$\boldsymbol{A}_{\text{near}}$（邻近组）与$\boldsymbol{A}_{\text{far}}$（非邻近组）

该方法的原理是将散射体表面上离散得到的子散射体分组。任意两个子散射体间的互耦根据它们所在组的位置关系而采用不同的方法计算。当它们是邻近组时，采用直接数值计算。而当它们为非邻近组时，则采用聚合-转移-配置方法计算，如图 2-6 所示。对于一个给定的场点组，首先将它的各个非邻近组内所有子散射体产生的贡献“聚合”到各自的组中心表达；再将这些组的贡献由这些组的组中心“转移”至给定场点组的组中心表达；最后将得到的所有非邻近组的贡献由该组中心“配置”到该组内各子散射体。对于散射体表面上的 N 个子散射体，直接计算它们的互耦时，每个子散射体都是一个散射中心即为一个单极子，共需数值计算量为 $O(N^2)$，如图 2-7 所示，而应用快速多极子方法，任意两个子散射体的互耦由它们所在组的组中心联系。各个组中心就是一个多极子，其数值计算量只为 $O(N^{1.5})$。对于源点组来说，该组中心代表了组内所有子散射体在其非邻近组产生的贡献；对场点组来说，该组中心代表了来自该组的所有非邻近组的贡献，从而大大减少了散射中心的数目。单层 FMM 算法 N 个未知量之间的耦合如图 2-8 所示，两层 FMM 算法 N 个未知量之间的耦合如图 2-9 所示。

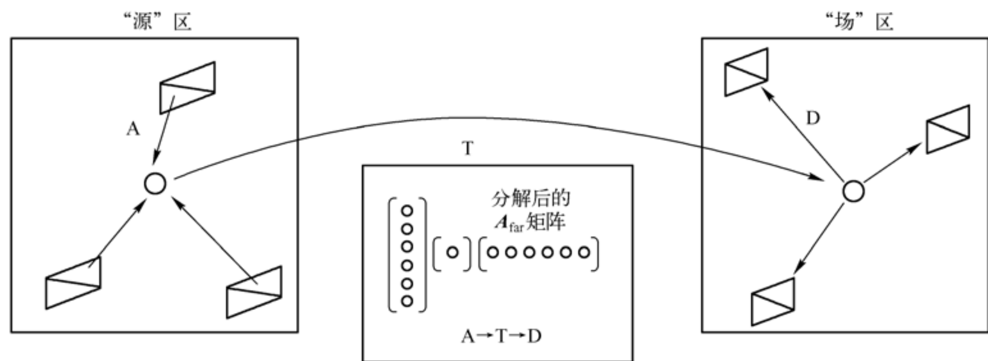


图 2-6　$\boldsymbol{A}_{far}$矩阵通过聚合（Aggregation）、转移（Translation）、配置（Disaggregation）实现矩阵矢量相乘

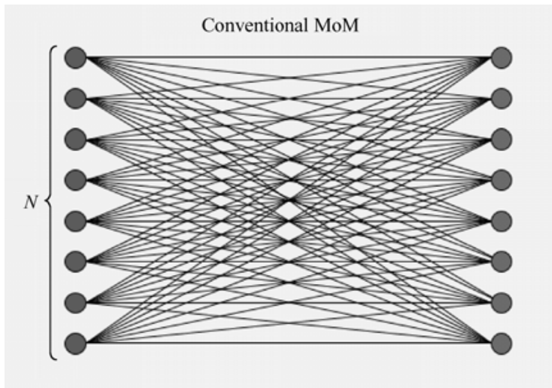


图 2-7　传统矩量法 N 个未知量之间的耦合

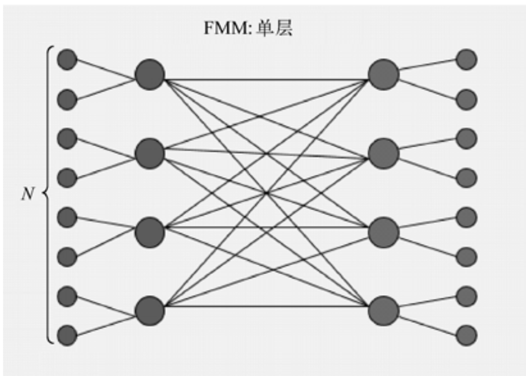


图 2-8　单层 FMM 算法 N 个未知量之间的耦合

多层快速多极子方法（MLFMM）是快速多极子方法在多层级结构中的推广。多层快速多极子方法采用多层分区计算，即对于附近区强耦合量直接计算；对于非附近区耦合量则用多层快速多极子方法实现。多层快速多极子方法基于树形结构计算，其特点是逐层聚合、逐

层转移、逐层配置、嵌套递推。

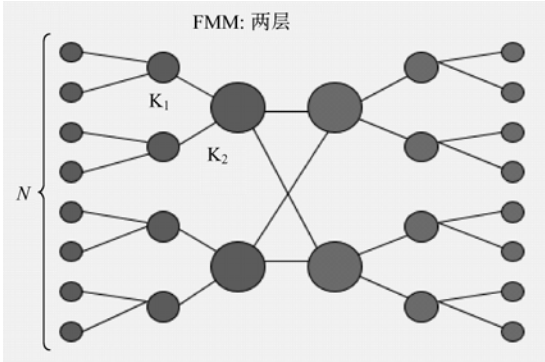


图 2-9　两层 FMM 算法 N 个未知量之间的耦合

下面详细介绍 MLFMM 求解三维导电目标电磁散射的步骤。

对于给定场子散射体 j，所有源子散射体 i 对它的贡献用快速多极子方法表达为

$$\sum_{i=1}^{N} A_{ji}a_i = \sum_{m'\in NG}\sum_{i\in G_{m'}} A_{ji}a_i + \frac{ik}{4\pi}\int \mathrm{d}^2\hat{k}\ \boldsymbol{V}_{fmj}\left(\hat{k}\right)\times \sum_{m'\in FG}\alpha_{mm'}\left(\hat{k}\cdot\hat{r}_{mm'}\right)\sum_{i\in G_{m'}}\boldsymbol{V}^*_{sm'i}\left(\hat{k}\right)a_i\ ,\quad j\in G_m \tag{2-30}$$

式中，a_i 为第 i 个源子散射体的电流幅度；$\boldsymbol{V}_{fmj}$、$\alpha_{mm'}$、$\boldsymbol{V}_{sm'i}$ 分别表示配置、转移、聚合因子。MLFMM 求解上式的具体步骤如下：

（1）最高层的多极展开计算公式

$$\boldsymbol{S}_{m'}\left(\hat{k}\right) = \sum_i V^*_{sm'i}\left(\hat{k}\right)a_i \tag{2-31}$$

$$\boldsymbol{V}_{sm'i}\left(\hat{k}\right) = \int_S \mathrm{d}s'\ e^{i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}_{im'}}\left[\boldsymbol{I}-\hat{\boldsymbol{k}}\hat{\boldsymbol{k}}\right]\cdot\boldsymbol{j}_i\left(\boldsymbol{r}_{im'}\right) \tag{2-32}$$

式中，m' 为最高层中子散射体 i 所在组的组中心；$\boldsymbol{S}_{m'}\left(\hat{k}\right)$、$\boldsymbol{V}_{sm'i}\left(\hat{k}\right)$ 分别为最高层 m' 组的聚合量和聚合因子。

（2）多极聚合

将源子散射体在子层子组中心的聚合量平移到父层父组中心，如图 2-10 所示。在波动问题中，由于多极子模式数只取决于源区尺寸（$L\sim kd$，d 为所在层的正方形或正方体的边长），因此从子层到父层，多极子模式数以两倍递增。所以越低的层级，需要的 $\hat{k}$ 值越大。

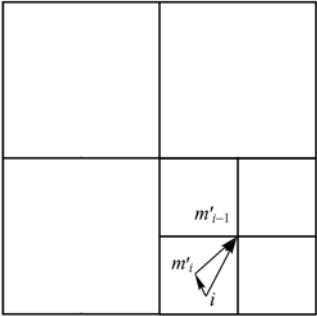


图 2-10　多极聚合过程，m'_l、m'_{l-1} 分别为第 l 层、第 $l-1$ 层中源子散射体 i 所在组的组中心

（3）多极转移

多极聚合到第二层后，便不再向上聚合。此时开始多极转移，即将源区的外向波转移为场区的内向波，为下行过程做准备。图 2−11 所示为二维多层快速多极子方法中，在第二层的多极转移示意图。

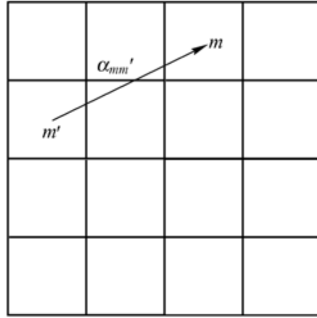


图 2−11　维多层快速多极子方法中，第二层的多极转移示意

注：m' 为源区组，m 为场区组，$\alpha_{mm'}$ 为转移因子。

在第二层，在源区组中心 m' 的聚合量 $\boldsymbol{S}_{m_2'}\left(\hat{k}\right)$ 即为以 m' 为中心的外向波，以场区组中心 m 为中心的内向波 $\boldsymbol{B}_{m_2}\left(\hat{k}\right)$ 按照如下公式计算

$$\boldsymbol{B}_{m_2}\left(\hat{k}\right)=\sum_{m'\in m}\alpha_{mm'}\left(\hat{k}\right)\boldsymbol{S}_{m_2'}\left(\hat{k}\right) \tag{2-33}$$

$$\alpha_{mm'}(\hat{r}_{mm'}\cdot\hat{k})=\sum_{l=0}^{L} i^l(2l+1)h_l^{(1)}(kr_{mm'})P_l(\hat{r}_{mm'}\cdot\hat{k}) \tag{2-34}$$

式中，$\alpha_{mm'}\left(\hat{k}\right)$ 为第二层上的转移因子。之所以选择第二层开始多极转移，是因为在第二层，远亲组即为非附近组，通过远亲组的转移计算可得到待求的所有非附近组的贡献。以上步骤为多层快速多极子方法的上行过程，下面步骤则是多层快速多极子方法的下行过程。

（4）多极配置

多极配置是将在以父层父组中心为中心的内向波转化为以子层子组中心为中心的内向波表达。多极配置是多极聚合的逆过程。与多极聚合中子层到父层采用内插计算类似，多极配置过程中，父层到子层采用伴随内插计算。

对于在第 $l-1$ 层、组中心为 m_{l-1} 的组内场点 j 而言，来自该组所有非附近组的贡献为

$$I=\int \mathrm{d}^2\hat{k}\ \boldsymbol{V}_{fm_{l-1}j}\left(\hat{k}\right)\cdot\boldsymbol{B}_{m_{l-1}}\left(\hat{k}\right) \tag{2-35}$$

离散求积分，得

$$I=\sum_{n'=1}^{K_{l-1}} w_{n'}\boldsymbol{V}_{fm_{l-1}j}\left(\hat{k}_{(l-1)n'}\right)\boldsymbol{B}_{m_{l-1}}\left(\hat{k}_{(l-1)n'}\right) \tag{2-36}$$

将父层父组的非附近组贡献平移到子层子组的组中心表达为

$$I=\sum_{n=1}^{K_l} w_n \boldsymbol{V}_{fm_l j}\left(\hat{k}_{l\,n}\right)\boldsymbol{B}_{m_l}^{(1)}\left(\hat{k}_{l\,n}\right) \tag{2-37}$$

式中，$w_{n'}$、w_n 分别为第 $l-1$ 层和第 l 层角谱空间积分的权系数；$\boldsymbol{B}_{m_l}^{(1)}\left(\hat{k}_{l\,n}\right)$ 为待定内向波幅度。

与多极聚合（MM）相似，多极配置（LL）中父层的配置因子可由子层的配置因子内插得到，即

$$\boldsymbol{V}_{fm_{l-1}j}\left(\hat{k}_{(l-1)n'}\right)=\mathrm{e}^{\mathrm{i}\boldsymbol{k}_{(l-1)n'}\cdot\boldsymbol{r}_{m_l m_{l-1}}}\sum_{n=1}^{K_l} W_{n'n}\boldsymbol{V}_{fm_l j}\left(\hat{\boldsymbol{k}}_{l\,n}\right) \tag{2-38}$$

交换 $\sum_{n=1}^{K_l}$ 和 $\sum_{n'=1}^{K_{l-1}}$ 次序，得到

$$\boldsymbol{B}_{m_l}^{(1)}\left(\hat{k}_{l\,n}\right)=\sum_{n'=1}^{K_{l-1}} W_{n'n}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\boldsymbol{k}_{(l-1)n'}\cdot\boldsymbol{r}_{m_l m_{l-1}}}\boldsymbol{B}_{m_{l-1}}\left(\hat{\boldsymbol{k}}_{(l-1)\,n'}\right)w_{n'}/w_n \tag{2-39}$$

（5）多极转移

为了继续从父层到子层递推下去，就必须得到来自子层子组的所有非附近组的贡献。在多极配置过程中，已经考虑了父层父组的所有非附近组的贡献，尚未考虑的是该子层子组的远亲组贡献。于是，在多极配置的基础上再叠加上子层子组的远亲贡献，就得到了子层子组的所有非附近组的贡献。计算式如下

$$\boldsymbol{B}_{m_l}^{(2)}\left(\hat{k}_{l\,n}\right)=\sum_{m'\in m\text{的远亲}}\alpha_{mm'}\left(\hat{k}\right)\boldsymbol{S}_{m_l'}\left(\hat{k}_{l\,\mathrm{n}}\right) \tag{2-40}$$

$$\boldsymbol{B}_{m_l}\left(\hat{k}_{l\,n}\right)=\boldsymbol{B}_{m_l}^{(1)}\left(\hat{k}_{l\,n}\right)+\boldsymbol{B}_{m_l}^{(2)}\left(\hat{k}_{l\,n}\right) \tag{2-41}$$

重复步骤（4）和步骤（5），直到最高层为止。

（6）部分场展开

对于最高层每个非空组 m，在其组中心进行部分场展开，得到 m 的所有非附近组对组内场点 j 的贡献。

$$I_{mj}=\int \mathrm{d}^2\hat{k}\ \boldsymbol{V}_{fmj}\left(\hat{k}\right)\cdot\boldsymbol{B}_m\left(\hat{k}\right) \tag{2-42}$$

式中，$V_{fmj}(\hat{k})$ 为最高层的配置因子；$B_m(\hat{k})$ 为最高层上以组 m 为中心的内向波，代表了组 m 的所有非附近组对组 m 的贡献。

最后，直接计算附近组的贡献，与非附近组的贡献相叠加，便得到了所有源子散射体对场子散射体的贡献。

2.2.2 典型应用

未知量为N问题经典矩量法的内存需求为N^2量级，而求解线性方程组的计算复杂度为N^3，因此随着问题规模的增大，矩量法求解需要大量的计算资源。多层快速多极子方法将内存降低到$N\times\log(\mathrm{N})$量级，求解时间降低到$N\times\log^2\mathrm{N}$ 量级。因此多层快速多极子方法非

常适合计算电大尺寸问题，包括各类电磁散射、电大尺寸天线、天线阵列、天线布局等。

表 2-1 列举了几类典型问题 MLFMM 与 MoM 方法所需的内存和计算时间对比。另外，FEKO 将 MLFMM 进行了扩展：①支持 MLFMM 与有限元（FEM）直接混合；②支持 MLFMM 与物理光学（PO）直接混合。以上方法详见后续章节。

表 2-1 MLFMM 的计算资源

N 未知量	MoM 方法	MLFMM 方法	Application 典型应用
100 000	75 GB	1 GB	● 军用飞机计算频率 690 MHz ● 舰船（115 m×14 m）计算频率 107 MHz ● 口径尺寸为 19λ 反射面天线
200 000	300 GB	2 GB	● 军用飞机计算频率 960 MHz ● 舰船（115 m×14 m）计算频率 150 MHz ● 口径尺寸为 27λ 反射面天线
400 000	1.2 TB	4.5 GB	● 军用飞机计算频率 1.37GHz ● 舰船（115 m×14 m）计算频率 214 MHz ● 口径尺寸为 38λ 反射面天线
1 000 000	7.5 TB	12 GB	● 军用飞机计算频率 2.2GHz ● 舰船（115 m×14 m）计算频率 340 MHz ● 口径尺寸为 60λ 反射面天线

2.3 有限元（FEM）的原理

有限元（FEM）方法是近似求解数理边值问题的一种数值技术，有限元方法思想最早在 20 世纪 40 年代由 Courant 提出，在 50 年代用于飞机设计。1969 年，Silvster 把有限元法推广应用于时谐电磁场问题。目前，该方法已广泛应用于工程和数学问题中。有限元法具有相对简单的公式，能够对复杂几何形状以及复杂非均匀介质目标进行模拟。

有限元法是采用整个区域上的变分原理或某种弱提法得到积分形式的控制方程，而边界条件通过引入积分表达式来隐式体现，也可以最后用显式引进。该方法求解问题的基本过程是用许多子域代替原来的连续区域。在子域中，未知函数用带有未知系数的简单插值函数来表示。因此，无限个自由度的原边值问题被转化成了有限个自由度的问题，也就是说，整个系统的解用有限数目的未知系数近似。然后，用里兹变分或伽辽金方法得到一组方程组。最后通过求解方程组得到边值问题的解。因此，有限元法分析边值问题的基本步骤可归纳为：①区域的离散或子域划分；②插值函数的选择；③方程组的建立；④方程组的求解。

有限元法适用于处理非均匀介质或介质与金属的组合结构、微带结构以及填充非均匀介质或各向异性介质的波导问题。但是，该方法同时域有限差分法一样，难以处理开放区域的辐射与散射问题。在计算中，由于计算机内存的限制同样需要引入吸收边界条件，如完全匹配层（PML），进行网格截断。

FEKO 中的有限元采用与矩量法混合方法（FEM/MoM 混合方法）。该方法可高效应用

于非均匀的介质或涂敷介质目标、微带结构以及复杂材料周期性结构的电磁散射与辐射分析。该方法首先引入一个包围介质结构的虚拟边界。在这个边界的内部用有限元法给出场的表达，而外部区域的场用边界积分表达。这两个区域中的场在虚拟边界上由场的连续性耦合起来，得到一个内部和边界场解的耦合方程。FEM/MoM 混合方法利用边界积分法直接满足索末菲辐射条件，避免了有限元法中网格的截断和设置吸收边界条件，又保留了有限元方法产生稀疏带状矩阵，可以高效存储和求解的优点。另外，FEKO 支持采用 MLFMM 方法与 FEM 直接混合，加速积分方程区域的高效求解，处理包含电大载体和复杂介质体的目标体，FEM 技术适合复杂介质计算，充分结合 FEM 与 MLFMM 方法的优势，复杂介质部分采用 FEM 方法，金属部分采用 MLFMM，计算效率高、精度可靠，可广泛应用于包含复杂介质材料的电大尺寸问题的计算。

2.4　时域有限差分（FDTD）

时域有限差分方法适合宽频带电磁问题分析，如宽带天线和电磁屏蔽效能、雷击等应用。

1966 年，K.S.Yee 首次提出一种电磁场数值计算新方法——时域有限差分（Finite Difference Time Domain, FDTD）方法。FDTD 方法用于求解微分形式的麦克斯韦旋度方程组，利用差分原理将旋度方程组离散成为一组时域递推公式。它是一种时域直接解法，随着时间的推进可以很方便地知道电磁场随时间的变化过程，在电磁工程各方面都得到了广泛应用。

麦克斯韦方程组的微分旋度方程为

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}+\boldsymbol{J} \tag{2-43}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}-\boldsymbol{J}_{\mathrm{m}} \tag{2-44}$$

式中，$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，单位为伏特每米（V/m）；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度，单位为安培每米（A/m）；$\boldsymbol{D}$ 为电通量密度，单位为库仑每平方米（$\mathrm{C/m^2}$）；$\boldsymbol{B}$ 为磁通量密度，单位是韦伯每平方米（$\mathrm{Wb/m^2}$）；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度，单位是安培每平方米（$\mathrm{A/m^2}$）；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{m}}$ 为磁流密度，单位是伏特每平方米（$\mathrm{V/m^2}$）。

各向同性线性媒质中的本构关系为

$$\begin{cases}\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E}\\ \boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}\\ \boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}\\ \boldsymbol{J}_{\mathrm{m}}=\sigma_{\mathrm{m}}\boldsymbol{H}\end{cases} \tag{2-45}$$

式中，ε 表示介质介电参数，单位为法拉每米（F/m）；μ 表示磁导系数，单位为亨利每米（H/m）；σ 表示电导率，单位为西门子每米（S/m）；σ_{m} 表示磁导率，单位为欧姆每米（Ω/m）。

在直角坐标系中，式（2-43）和式（2-44）可写为下式

$$\begin{cases}\dfrac{\partial H_z}{\partial y}-\dfrac{\partial H_y}{\partial z}=\varepsilon\dfrac{\partial E_x}{\partial t}+\sigma E_x\\\dfrac{\partial H_x}{\partial z}-\dfrac{\partial H_z}{\partial x}=\varepsilon\dfrac{\partial E_y}{\partial t}+\sigma E_y\\\dfrac{\partial H_y}{\partial x}-\dfrac{\partial H_x}{\partial y}=\varepsilon\dfrac{\partial E_z}{\partial t}+\sigma E_z\end{cases} \tag{2-46}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial E_z}{\partial y}-\dfrac{\partial E_y}{\partial z}=-\mu\dfrac{\partial H_x}{\partial t}-\sigma_m H_x\\\dfrac{\partial E_x}{\partial z}-\dfrac{\partial E_z}{\partial x}=-\mu\dfrac{\partial H_y}{\partial t}-\sigma_m H_y\\\dfrac{\partial E_y}{\partial x}-\dfrac{\partial E_x}{\partial y}=-\mu\dfrac{\partial H_z}{\partial t}-\sigma_m H_z\end{cases} \tag{2-47}$$

Yee 元胞中电场与磁场各结点的位置关系如图 2-12 所示，每个磁场分量由 4 个电场分量围绕，同样每个电场分量由 4 个磁场分量围绕，这种电磁场分量的空间取样方式适用于麦克斯韦方程的差分计算，也能够很好地描述电磁场的传播特性，电场与磁场在时间顺序上交替采样，抽样的时间间隔相差半个时间步，这样麦克斯韦方程组离散后变为显示差分方程，可以直接迭代求解，不需要求解矩阵。只需要给出初始值和边界条件就可以逐步迭代求出各个时间步的空间电磁场分布。

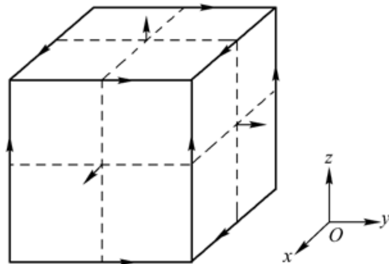


图 2-12　FDTD 离散中的 Yee 元胞

数值稳定条件：FDTD 算法中数值解的稳定性主要与时间步长 Δt 和空间离散尺度 Δx、Δy、Δz 有关，为了保证数值稳定性，它们必须满足一定关系，可以推导出各离散参数应该满足如下关系式

$$\Delta t \leqslant \frac{1}{v\sqrt{\dfrac{1}{(\Delta x)^2}+\dfrac{1}{(\Delta y)^2}+\dfrac{1}{(\Delta z)^2}}} \tag{2-48}$$

这就是 FDTD 的数值稳定条件，又称为 Courant 稳定条件。其中，$v=1/\sqrt{\mu\varepsilon}$ 为介质中的光速，如果媒质不均匀，那么不同区域电磁波的速度 v 不同，那么应该取速度最大值。普通 FDTD 通常采用均匀网格，3 个方向的网格离散相同，即 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=\Delta s$，Courant 稳定条件变为下式

$$v\Delta t \leqslant \frac{\Delta s}{\sqrt{3}} \tag{2-49}$$

数值色散：平面波在自由空间中传播时，其相速度与频率无关，由于 FDTD 方法采用了

差分近似后导致相速度与频率有关，称之为数值色散，这种色散也与空间离散间隔有关，只有离散间隔足够小的时候，这种数值色散的影响才可以忽略。

$$\frac{\sin^2\left(\dfrac{k_x\Delta x}{2}\right)}{\left(\dfrac{\Delta x}{2}\right)^2}+\frac{\sin^2\left(\dfrac{k_y\Delta y}{2}\right)}{\left(\dfrac{\Delta y}{2}\right)^2}+\frac{\sin^2\left(\dfrac{k_z\Delta z}{2}\right)}{\left(\dfrac{\Delta z}{2}\right)^2}-\frac{1}{c^2}\frac{\sin^2\left(\dfrac{\omega\Delta t}{2}\right)}{\left(\dfrac{\Delta t}{2}\right)^2}=0 \tag{2-50}$$

式（2−50）为 FDTD 方法中数值色散的一般表达式，表明 FDTD 计算中波的传播速度与传播方向有关，这是离散后引起的各向异性特性，当Δx、Δy、Δz、Δt 趋于零的时候式（2−50）变为式（2−51）。

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2=k_x^2+k_y^2+k_z^2 \tag{2-51}$$

式（2−51）为自由空间平面波的关系，此时色散的影响可以减小到任意小，但是这样必然会导致计算时间和内存的增加。所以要选择合适的网格剖分尺寸。实际计算中一般要求：

$$\max(\Delta x,\Delta y,\Delta z)\leqslant\frac{\lambda}{12} \tag{2-52}$$

2.5　高频近似方法

FEKO 软件支持物理光学、大面元物理光学、几何光学、一致性绕射理论等高频算法。

物理光学（Physical Optics）方法是一种基于表面电流的方法，它应用积分方程的表达形式，并且遵循物理上合理的高频假设，即由物体上某一点对该物体其他点的散射场的贡献和入射场相比是很小的。因此，表面上每一点的总场为 $\boldsymbol{H}_T=\boldsymbol{H}_0+\boldsymbol{H}_s\approx\boldsymbol{H}_0$，这里 $\boldsymbol{H}_0$ 为入射场，$\boldsymbol{H}_s$ 为物体其他部分散射的场。由于 $\boldsymbol{H}_s$ 不再出现在积分号内，因此使得关于散射场的表达式大为简化。

$$\boldsymbol{H}_s(\boldsymbol{r})=2\int_s(\hat{n}\times\boldsymbol{H}_0)\times\nabla\varphi\mathrm{d}s \qquad \varphi=\frac{\mathrm{e}^{ikR}}{4\pi R} \tag{2-53}$$

式（2−53）中用物理光学表面电流密度 $J_{\mathrm{po}}=2(\hat{n}\times\boldsymbol{H}_0)$ 来近似物体表面上的感应电流。式中，$\hat{n}$ 是表面单位法向线矢量，因子 2 用以满足理想导体表面的边界条件。由入射场确定的表面切向场，可看作散射场的电流源：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{PO}}=\begin{cases}2\hat{n}\times\boldsymbol{H}_{\mathrm{inc}} & \text{照亮区域}\\ 0 & \text{阴影区域}\end{cases} \tag{2-54}$$

式（2−53）中积分可以解释为表面上的各惠更斯子波的叠加，其中格林函数的梯度$\nabla\varphi$可粗略地解释为惠更斯子波。应用物理光学方法要求给定几何结构和入射场。所以 PO 具有如下性质：

1）PO 积分是在非封闭的表面亮区单元上进行的。

2）物体表面切平面上的总场是用入射场来表示的，这里散射表面的曲率半径远大于波长λ。

3）散射体表面暗区一侧的场为零。

当入射场照射到散射体表面上并在表面亮区感应其物理光学电流 $\vec{J}_{\mathrm{po}}$ 时，只有镜面反射点附近的那些电流才对散射场有贡献。这些电流也就是射线光学反射点附近的电流。所以，当 PO 用于远大于波长的表面上时，仅仅在反射点附近的区域才产生散射。

由前可知，目标表面的总场大小由入射电场决定，当电磁波入射到散射体面上时，有的区域能被电磁波照射到，有的区域却照射不到，如图 2-13 所示，被照射区域称为亮区，亮区的总场为非零，而照射不到的暗区的总场却为零，这是物理光学法的主要缺点之一。该方法的另一个主要缺陷是没有考虑散射体上的边缘、尖劈等不连续处所产生的电流对散射的贡献，故其计算结果在反射方向的近轴方向才有较好的计算精度，而在大角度辐射区内的计算结果偏差较大。

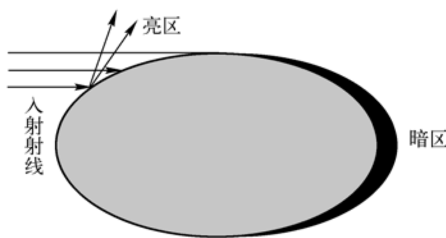


图 2-13　物体表面亮区和暗区的划分示意图

物理光学理论通过对感应场的近似积分得到空间场，入射波照射到目标体表面，在表面亮区产生感应电流。采用物理光学方法能快速地计算电大尺寸目标体的特性，而且结果的精度可以满足工程需要。物理光学积分是在非封闭的表面亮区单元上进行的，目标体表面暗区一侧的场为零，FEKO 中的物理光学方法对暗区场值作了修正，所以能够保证计算精度。

大面元物理光学（Large element Physical Optics）对基函数相位进行修正，采用与波长相当甚至几个波长剖分模型，大大降低了目标的网格规模。大面元物理光学三角基函数为

$$\boldsymbol{f}_n^{ph}(r)=\begin{cases}\dfrac{l_n}{2A_n^+}\boldsymbol{\rho}_n^+.e^{-jk_n\cdot(\boldsymbol{\rho}_n^+-\boldsymbol{\rho}_{nc}^+)}, r\text{位于}T_n^+\text{中}\\ \dfrac{l_n}{2A_n^-}\boldsymbol{\rho}_n^-.e^{-jk_n\cdot(\boldsymbol{\rho}_n^--\boldsymbol{\rho}_{nc}^-)}, r\text{位于}T_n^-\text{中}\end{cases}$$

由上式可见，大面元物理光学对基函数进行相位修正，因此三角单元可以采用数倍波长进行划分，相对传统物理光学，网格数大幅减少，减少内存需求，该技术非常适合计算光滑结构的超电大尺寸平台天线布局和雷达隐身问题。

2.6　主要的混合方法

2.6.1　矩量法与有限元混合原理

矩量法与有限元方法混合技术，具备了有限元分析复杂结构和材料的能力，在边界上采

用积分方程代替匹配层作为边界条件，缩小了求解区域，如图 2-14 所示。该混合技术解决了有限元吸收边界条件引入大量未知量的问题，同时避免了矩量法分析非均匀介质效率不高的问题。

$$\hat{n}\times\boldsymbol{E}^{\mathrm{FEM}}\Big|_{\partial\Omega}=\hat{n}\times\boldsymbol{E}^{\mathrm{MoM}}\Big|_{\partial\Omega}$$
$$\boldsymbol{J}_s^{\mathrm{FEM}}=-\boldsymbol{J}_s^{\mathrm{MoM}}$$

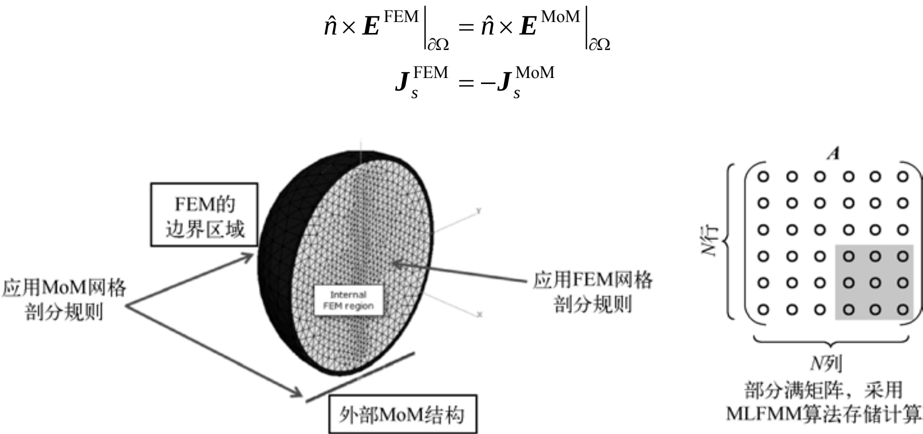


图 2-14　有限元与矩量法混合

2.6.2 多层快速多极子与有限元混合技术

多层快速多极子与有限元混合技术，可以提高计算效率，相对于有限元与矩量法混合技术，更适合分析电大尺寸模型。矩量法和有限元混合求解：矩阵分为两部分，即有限元区域的稀疏矩阵N_{FEM}和矩量法区域的满矩阵N_{MoM}，如图 2-15 所示。矩量法区域将限制计算规模，因此需要采用多层快速多极子对矩量法矩阵区域N_{MoM}进行加速。

$$N = N_{FEM} + N_{MoM}$$

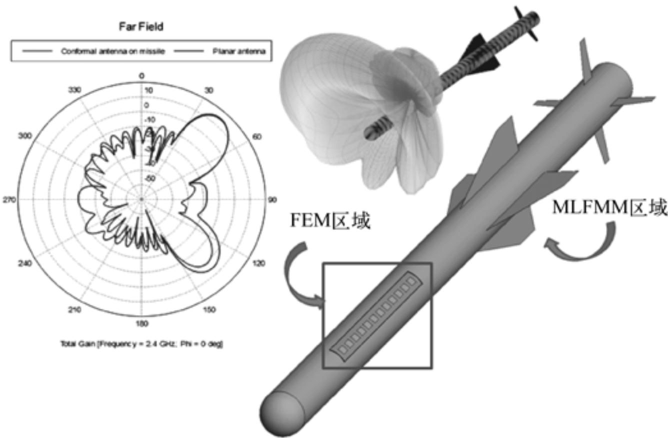


图 2-15　MLFMM 与 FEM 混合求解

2.6.3 矩量法与高频混合技术

矩量法与物理光学混合算法是将模型分为矩量法区域与物理光学区域，分别采用矩量法与物理光学方法求解，原理如图 2−16 所示，当矩量法区域与物理光学区域相连时，网格需要确保电连续性。

传统的矩量法与 PO 混合计算公式为

$$\hat{n}\times(L_E(J_{\mathrm{MoM}})+L_E(J_{\mathrm{PO}}))=\hat{n}\times E_{\mathrm{inc}} \tag{2-55}$$

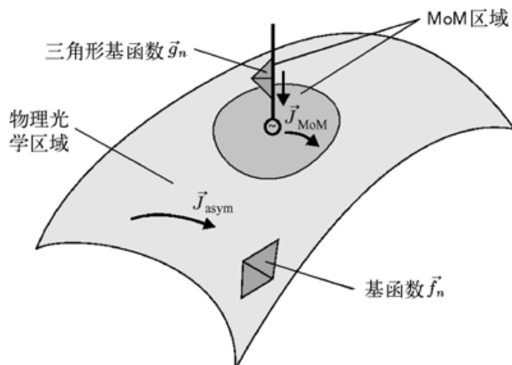


图 2−16　矩量法与物理光学方法

式中，$\hat{n}$ 为表面向量；L_E 为积分算子；J_{MoM} 为矩量法区域的表面电流；J_{PO} 为物理光学区域的表面电流系数；E_{inc} 为右边向量。

2.6.4 多层快速多极子与高频混合技术

矩量法区域为满矩阵，对于天线布局问题，当设置较大矩量法区域提高精度时，内存需求和仿真时间都面临挑战，因此需要采用 MLFMM 算法加速矩量法区域的求解。

多层快速多极子算法加速矩量法的矩阵求解，从而提高矩量法区域的求解效率，降低内存需求。

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{MoM}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{MoM}}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{MoM}}^{\mathrm{near}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{MoM}}+\frac{-jk}{4\pi}\int \mathrm{d}^2\hat{k}\boldsymbol{R}_{\mathrm{fim}}(\hat{k})\boldsymbol{T}_{mn}(\hat{k}\mathrm{g}r_{mn})\boldsymbol{S}_{\mathrm{snj}}(\hat{k}) \tag{2-56}$$

式中，$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{MoM}}$ 是矩量法区域的阻抗矩阵；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{MoM}}$ 是矩量法区域的电流权重系数；$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{MoM}}^{\mathrm{near}}$ 是近场矩阵；$\boldsymbol{R}_{\mathrm{fim}}(\hat{k})$ 与 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{snj}}(\hat{k})$ 为汇聚配置矩阵；$\boldsymbol{T}_{mn}(\hat{k}\mathrm{g}r_{mn})$ 为转移矩阵。

MLFMM 加速矩量法区域与物理光学区域互耦计算效率，多极子迭代求解加速物理光学区域电流系数计算，矩量法与物理光学互耦公式为

$$(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{MoM}}+\boldsymbol{A}_{\mathrm{MoM_PO}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{PO_MoM}})\boldsymbol{I}_{\mathrm{MoM}}=\boldsymbol{V}_{\mathrm{MoM}}-\boldsymbol{A}_{\mathrm{MoM_PO}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PO}} \tag{2-57}$$

式中，$\boldsymbol{A}_{\mathrm{MoM_PO}}$和$\boldsymbol{B}_{\mathrm{PO_MoM}}$ 分别是矩量法与物理光学法互耦矩阵；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{MoM}}$ 是矩量法区域的激励源；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{PO}}$ 是物理光学区域的电流系数。矩量法电流 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{MoM}}$ 通过 MLFMM 方法迭代求解，之后求解物理光学区域的 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{PO}}$ 。

大面元物理光学加速传统物理光学求解，大面元物理光学对基函数进行相位修正，因此三角单元可以采用数倍波长进行划分，相对传统物理光学，网格数大幅减少，内存需求极少，计算速度快。

$$\boldsymbol{f}_n^{\mathrm{ph}}(r)=\begin{cases}\dfrac{l_n}{2\boldsymbol{A}_n^{+}}\boldsymbol{p}_n^{+}.\mathrm{e}^{-jk_n.(\boldsymbol{p}_n^{+}-\boldsymbol{p}_{nc}^{+})},\boldsymbol{r}\text{位于}T_n^{+}\text{中}\\ \dfrac{l_n}{2\boldsymbol{A}_n^{-}}\boldsymbol{p}_n^{-}.\mathrm{e}^{-jk_n.(\boldsymbol{p}_n^{-}-\boldsymbol{p}_{nc}^{-})},\boldsymbol{r}\text{位于}T_n^{-}\text{中}\end{cases} \quad (2-58)$$

加入以上加速改进技术，MLFMM/LEPO 相比 MOM/PO 算法，精确计算区域增大，高频计算区域网格划分更少，计算效率和计算精度可以提升，仿真精度更接近 MLFMM 算法。

第 3 章

FEKO基础



要熟练应用 Altair FEKO 软件来分析电磁场问题，首先要熟悉软件的模块组成和工作界面，本章将详细介绍 Altair FEKO 的前处理模块 CADFEKO、后处理模块 POSTFEKO 以及脚本编辑模块 EDITFEKO 工作界面，并对各模块的菜单、工具按钮、树形浏览器、3D 模型视图、状态栏等做详细的解释说明，以帮助读者熟练掌握 FEKO 软件的使用。如果能够结合后续章节的操作应用，则效果会更佳。

3.1　FEKO 工作环境介绍

3.2　前处理模块——CADFEKO

3.3　后处理模块——POSTFEKO

3.4　命令流脚本编辑器 EDITFEKO

3.5　相对工作平面（Workplane）的应用

3.6　建立 FEKO 工程的仿真过程

3.1 FEKO工作环境介绍

3.1.1 FEKO主要模块组成

FEKO 模块组成框图如图 3−1 所示。

1）CADFEKO 模块：FEKO 前处理模块，具有建模、网格划分、材料定义与赋材料、端口激励与加载、求解参数设置（频率、辐射电场/磁场、S 参数）以及求解方法设置等。

2）EDITFEKO 模块：FEKO 命令脚本编辑器（*.pre），属于高级应用模块。

3）POSTFEKO 模块：FEKO 后处理模块，计算参数（辐射和散射电场/磁场、RCS、增益、方向性系数、阻抗、反射系数、SAR、极化、轴比等）的直观显示（3D 云图、2D 曲线、动画、图片和数据列表输出以及计算报告生成）等。

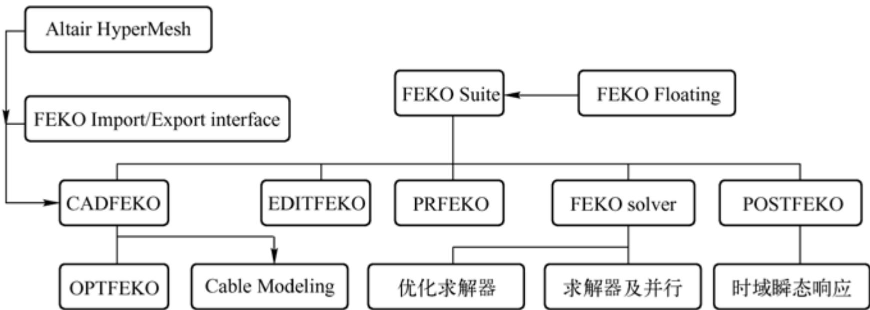


图 3−1　FEKO 模块组成框图

4）PREFEKO 模块：预处理模块，内部执行的是“PREFEKO.exe *.pre”，即把命令脚本和网格文件（*.cfm）合并，生成.fek 文件，并对工程文件进行检查。

5）FEKO Solver 模块：FEKO 求解器模块，包含了矩量法、高阶矩量法、多层快速多极子、有限元、时域有限差分、高频方法（物理光学法、大面元物理光学法、射线几何光学法、一致性绕射法）以及各种混合算法等，并支持多核并行（矩量法、时域有限差分支持 GPU 加速）。

6）时域瞬态响应：在 POSTFEKO 后处理模块中，定义任意时域瞬态波形，内部通过 FFT 变化，把计算得到的频域响应转换成时域瞬态响应。

7）OPTFEKO 模块：FEKO 的优化分析模块，所有的优化设置均在 CADFEKO 中完成，在优化求解时，直接调用内部的优化器（包括单纯形法−Simplex、遗传算法−GA、粒子群法−PSO、扫参法−GridSearch 等）。

3.1.2 FEKO文件组成与各模型之间的关系

图 3−2 清晰地说明了各个模块之间的关系。

1）在 CADFEKO 中创建一个工程文件*.cfx，保存后会自动生成*.cfs、*.cfx、*.cfm、

.pre、.opt 格式的文件（如果设置了优化求解）。

2）在 CADFEKO 中调用 PREFEKO（Solver/Run→PREFEKO），会自动生成*.fek 文件（即*.pre 和*.cfm 的组合文件，包含了电参数和网格等所有信息）。

3）在 EDITFEKO 中，可以直接编辑自动生成的脚本文件（*.pre）。

4）在 CADFEKO 中，通过“Solver/Run→FEKO Solver”会直接启动 FEKO 求解器，计算完成后直接生成*.bof、*.out 等结果文件。

5）在 POSTFEKO 中，可以直接读入*.fek 文件，并读入*.bof 中的计算结果，对所有的计算结果进行显示设置、保存之后，会生成*.pfs 文件。

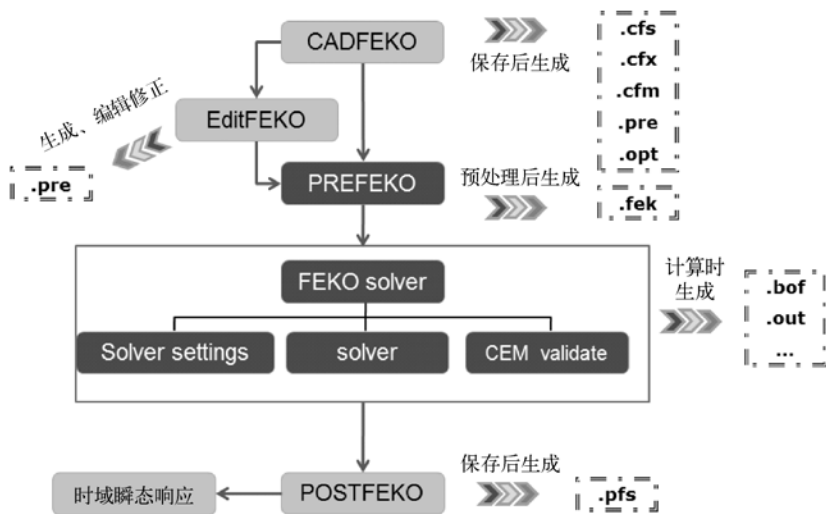


图 3-2　模块架构关系框图

不同文件扩展名的说明：

1）*.cfx 是在 CADFEKO 中建立的工程文件，可以通过“CADFEKO_batch *.cfx –#var1= ,–#var2=”格式来通过命令行修正模型、电参数等，在进行优化计算时，当自变量（如几何参量等）变化时，FEKO 内部就调用该命令行。

2）*.cfs 是辅助文件，包含了工作平面、视图等相关内容。

3）*.cfm 是网格信息文件（包括变量、网格结点、材料等）。

4）*.opt 包含了优化设置的辅助文件，通过命令行提交优化计算时，需要该文件。

5）*.pre 包含了材料定义、电特性设置（工作频率、激励、加载）、计算求解设置、计算方法等的脚本命令流文件，可在 EDITFEKO 中进行编辑。

6）*.fek 是预处理（PREFEKO）后生成的文件，是“*.cfm+*.pre”的合成文件，包含了求解前的所有信息：关于模型的网格信息（在*.pre 开始的 IN 命令中读入*.cfm 网格文件）、材料信息（DI 命令）、求解设置（LZ、A0、A1、AE、AW、FF、FE）和计算方法等，是 FEKO 求解器和 POSTFEKO 直接调用的文件。

在 CADFEKO 中，单击“Home”菜单中的“Save”按钮，会自动生成.cfx、.cfs、.cfm、.pre 文件，如果添加了优化设置，则通过保存，也会生成.opt 文件。

7）*.bof 是 FEKO 求解完成后生成的二进制结果文件，只能利用 POSTFEKO 打开，也

可以通过 LUA 脚本语言来读取.bof 文件中的结果，并进行显示和其他数据处理。

8）*.out 是 FEKO 求解完成后生成的文本结果文件，存储了很多重要的信息，即计算平台、计算复杂度、重要计算结果参数[CADFEKO 可以控制是否输出]、计算资源统计等，可以利用写字板直接打开；在 POSTFEKO 中，也可以通过“Home”菜单中的“Out File”图标按钮来直接读入并显示。

9）*.pfs 是后处理 POSTFEKO 进行结果显示设置（2d 曲线、3d 云图等）完成后保存所生成的文件，可以利用 POSTFEKO 直接打开。

图 3-3 所示详细说明了各个模块之间相互调用的快捷方式。

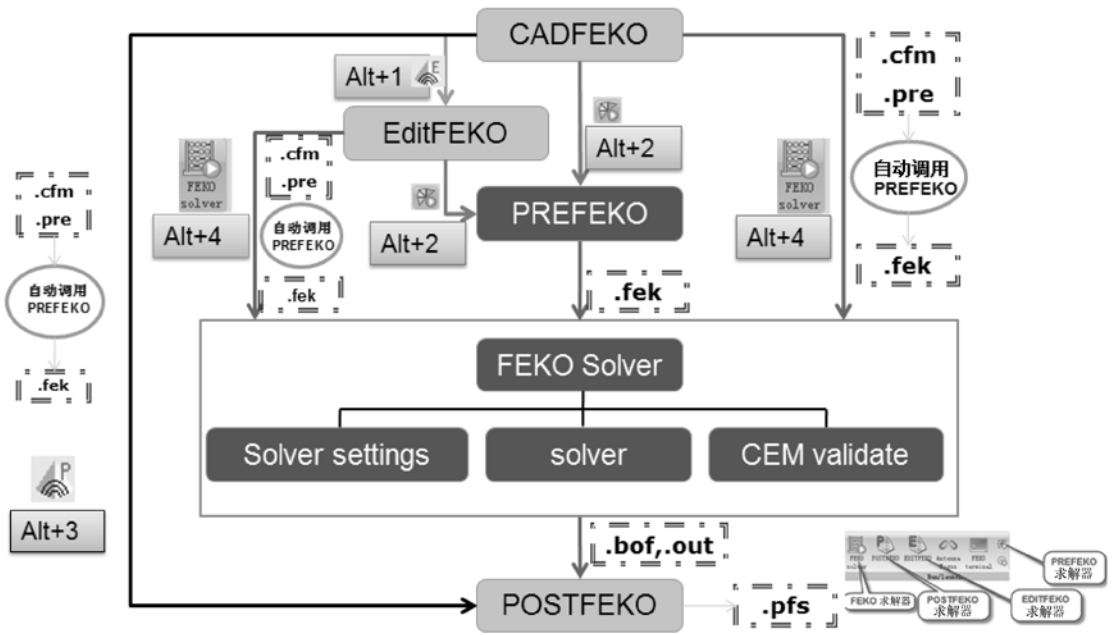


图 3-3 各模块之间相互调用的快捷方式

在 CADFEKO 中，可以通过以下多种方式来启动 PREFEKO，如图 3-4 所示，以便生成或更新*.fek 文件。

方式 1：在菜单栏中的“Solver/Run”下单击“PREFEKO”图标按钮。

方式 2：按〈Alt+2〉快捷键。

方式 3：单击右上角快捷图标“ ”中的 。

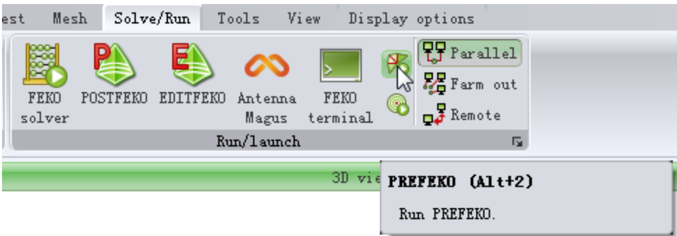


图 3-4 CADFEKO 启动 FEKO 求解器

在 CADFEKO 中可以通过以下几种方式直接调用 FEKO 求解器，如图 3-5 所示。如果没有调用 PREFEKO 进行预处理，则 FEKO 会自动进行 PREFEKO 操作，调用 FEKO 求解器时，会自动生成或修正*.fek 文件，并启动 FEKO 求解计算。

方式 1：在菜单栏中的“Solver/Run”下单击“FEKO Solver”图标按钮。

方式 2：按〈Alt+4〉快捷键。

方式 3：单击右上角快捷图标“”中的。

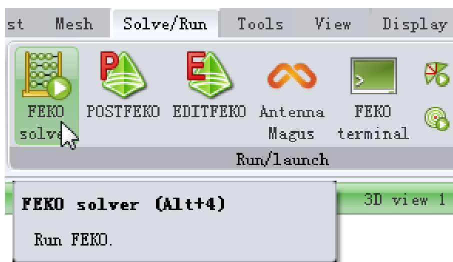


图 3-5　CADFEKO 启动 FEKO 求解器

在 CADFEKO 中可以通过以下几种方式直接启动 POSTFEKO，如图 3-6 所示。如果没有进行 PREFEKO 预处理操作，则在启动 POSTFEKO 时，会自动启动 PREFEKO，生成或更新*.fek 文件。

方式 1：在菜单栏中的“Solver/Run”下单击“POSTFEKO”图标按钮。

方式 2：按〈Alt+3〉快捷键。

方式 3：单击右上角快捷图标“”中的“”。

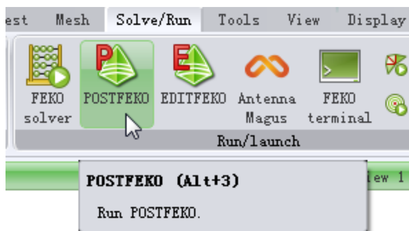


图 3-6　CADFEKO 启动 POSTFEKO

在 CADFEKO 中可以通过以下几种方式直接启动 EDITFEKO，如图 3-7 所示。如果没有保存*.cfx，则会提示保存。

方式 1：在菜单栏中的“Solver/Run”下单击“EDITFEKO”图标按钮。

方式 2：按〈Alt+1〉快捷键。

方式 3：单击右上角快捷图标“”中的。

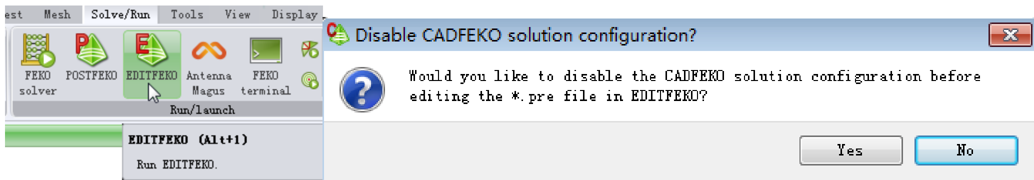


图 3-7　CADFEKO 启动 EDITFEKO

从 CADFEKO 启动 EDITFEKO 时，会弹出“Disable CADFEKO solution configuration”对话框，情况有如下几种：

1）单击“Yes”。

- 在 CADFEKO 中将锁定树形浏览器中的 Global 和 Configuration specific，即无法再进行求解设置、计算方法的设定、工作频率的设定、求解设定等。
- 在 CADFEKO 中只能进行模型的建立、编辑、网格划分。
- 在 EDITFEKO 中可以进行电参数的修改、设定等。
- 可以在 CADFEKO 或 EDITFEKO 中调用 FEKO 求解器和后处理-POSTFEKO。
- CADFEKO 中，在菜单栏中单击“Solve/Run”→“Enable Solutions”，如图 3-8 所示，重新激活求解设置，但更新过的.pre 文件会被另存为*_orig_1.pre，.pre 文件恢复为更新前的状态。

注意：CADFEKO 设定完成后，会自动生成.pre 文件（标准格式），但 EDITFEKO 设置过的脚本是无法返回到 CADFEKO 的。为保证同一个工程的.cfx、.pre 一致性，在进入 EDITFEKO 中时，建议选择“Yes”。

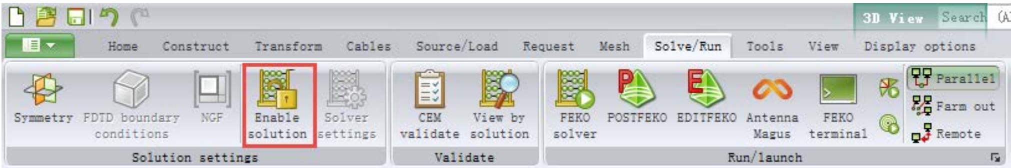


图 3-8　如何激活 CADFEKO 中的设置

2）单击“No”。

- 在 CADFEKO 中可以进行电参数的设置，预处理之后会自动更新.pre 文件。
- 不适合对.pre 文件进行编辑或进行高级设置。
- 建议在 EDITFEKO 中，把打开的*.pre 文件另存为*_XXX.pre 文件，在 EDITFEKO 中直接提交 FEKO 计算，进入 POSTFEKO。这里的含义相当于共用一个模型（调用相同的 cfm）实现不同计算目标的多个工程，如图 3-9 所示。

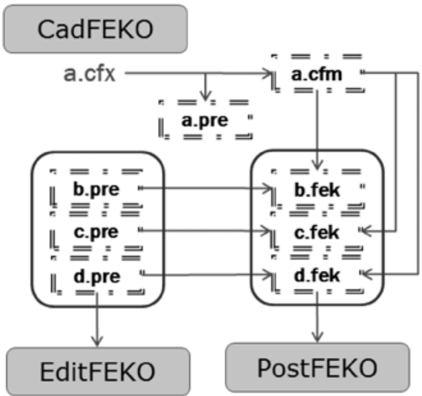


图 3-9　多个脚本调用同一个模型

在 EDITFEKO 模块中提供了两种方式调用 PREFEKO、FEKO 求解器、POSTFEKO 等。

1）菜单操作方式：“Solve/Run”→“PREFEKO”，“Solve/Run”→“FEKO Solver”，“Solve/Run”→“POSTFEKO”。

2）快捷键操作方式：Alt+2，Alt+4，Alt+3。

EDITFEKO 中，按〈Alt+2〉快捷键进行预处理-PREFEKO，会生成或更新.fek 文件。

EDITFEKO 中，按〈Alt+4〉快捷键调用 FEKO 求解器，对.fek 文件进行计算，如果没有.fek 文件或没有更新.fek 文件，会自动调用 PREFEKO 进行预处理，生成新的 fek 文件，然后进行求解。

EDITFEKO 中，按〈Alt+3〉快捷键调用 POSTFEKO，打开.fek 文件进行后处理，如果没有.fek 文件或没有更新.fek 文件，会自动调用 PREFEKO 进行预处理，生成新的 fek 文件。

在 EDITFEKO 模块中，通过菜单操作“Run”→“CADFEKO”打开 CADFEKO。

只有进行一些高级应用需要修正命令流的时候，才采用 EDITFEKO 来启动求解器和后处理——POSTFEKO 的方式。

一般情况下，所有的设置都放在 CADFEKO 中进行，方便快捷，利用自动生成的脚本在 EDITFEKO 中参数化脚本。

3.1.3 关于命令行提交方式和批处理说明

下面介绍如何通过命令行启动 FEKO 求解器和进行批处理。

方式 1：

- PREFEKO horn.pre
- Runfeko horn.pre　　** 运行过程信息在屏幕上输出

方式 2：

- PREFEKO horn.pre
- Runfeko horn.pre >horn_out.out　　** 运行过程信息输出到“horn_out.out”文件中

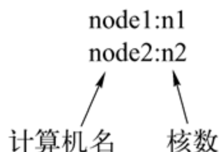
方式 3：

- Runfeko horn.fek >horn_out.out　　** 运行过程信息输出到“horn_out.out”文件中

并行方式：

- Runfeko horn.fek –np n >horn_out.out　　** 采用 *n* 个进程进行计算，调用的当前** 计算机资源
- Runfeko horn.fek –np n --machines-file m >horn_out.out　　** 采用 *n* 个进程（参与** 计算的计算机和核数在 m 文件中指定）进行计算

注: m 文件的书写格式如下，其中 n1+n2=n。



批处理方式：把多个设置好的工程文件（在同一个文件夹下）按照如下方式写成批处理文件（horn_batch.bat）。直接双击“horn_batch.bat”文件启动批处理计算。

- Runfeko horn1.fek –np n1 >horn1_out.out。
- Runfeko horn2.fek –np n2 >horn2_out.out。
- Runfeko horn3.fek –np n1 >horn3_out.out。

或采用 FEKO 自带的批处理命令工具启动批处理任务，如图 3-10 所示。

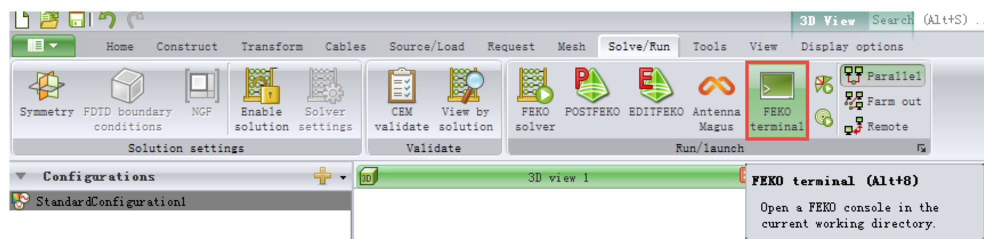


图 3-10　CADFEKO 中启动批处理命令启动界面

3.1.4 命名规则说明

工程文件、模型、材料名称、变量名称、求解设置等均涉及命名的问题，建议读者养成良好的应用习惯：

1）不要采用特殊字符，如+、-、*、/、\、^、@等。

2）对于空格，建议采用下画线“_”，即使软件支持空格。

3）第一个字符尽量不要是数字。

4）不要包含中文。

5）命名时可以采用字符、数字、下画线等的组合方式。

6）设定的名称要便于识别。

采用矩量法计算 10GHz 的一个喇叭天线的工程，比较好的命名方式是:

- horn_mom_10GHz.cfx。

设定变量：

- 工作频率 freq，工作波长 lam，三角形单元长度 tri_len。
- 相对介电常数 epsr。
- 介质损耗正切 tand。
- ……。

设定材料、工作平面、模型等。

设定远场、近场、电流等：

- 全空间辐射远场“ff_3d”。
- xoz 极化面辐射远场“ff_xoz”。

3.2　前处理模块——CADFEKO

以 Altair FEKO 14.0 为例，单击“开始”→“所有程序”→“Altair HyperWorks 14.0”→“FEKO 14.0”→“CADFEKO”命令，弹出 CADFEKO 启动界面，如图 3-11 所示。

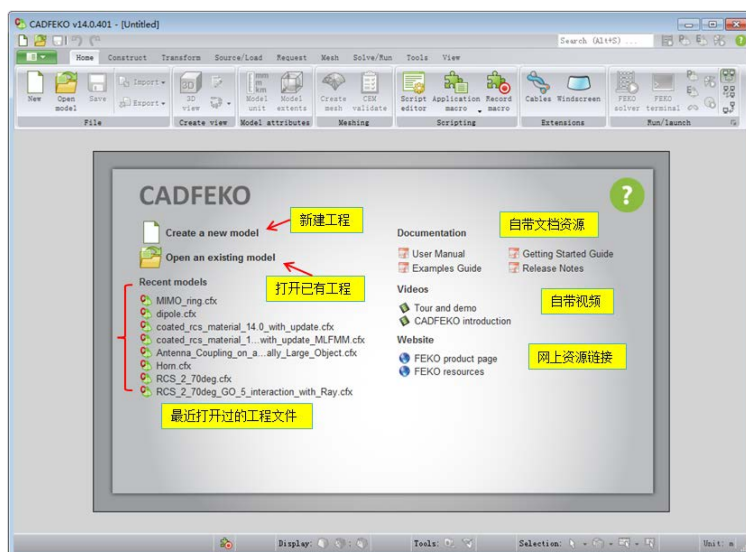


图 3-11　CADFEKO 启动界面

在图 3-11 中，单击“Create a new model”或打开一个已有的工程，进入 CADFEKO 主界面，如图 3-12 所示。

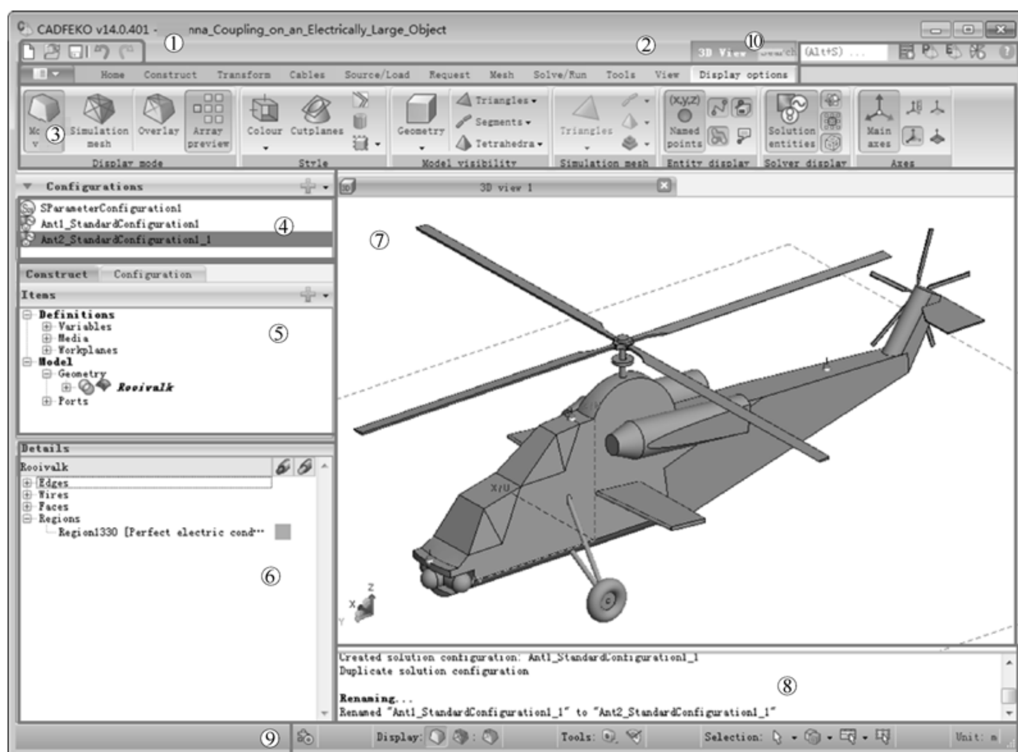


图 3-12　CADFEKO 主界面

在图 3-12 中包括了：①“工程文件管理快捷操作按钮集”；②“菜单栏”；③“工具

按钮”；④“求解树形管理器”；⑤“模型与求解设置树形浏览器”；⑥“模型详细信息树形管理器”；⑦“模型 3D 视图区”；⑧“消息框”；⑨“快捷工具条”；⑩“模块快捷按钮集”等。

3.2.1 菜单栏与工具按钮

工程文件管理快捷操作按钮集中的主要按钮如下：

1）新建工程(.cfx)：“ ”。

2）打开工程文件(.cfx)：“ ”。

3）保存工程文件(.cfx)：“ ”。

4）撤销操作(Undo)：“ ”。

5）返回操作(Redo)：“ ”。

菜单与工具栏说明如下：

1）“ ” 菜单如图 3-13 所示。

图 3-13 “工程文件管理”菜单

2）“Home”菜单中的各按钮如图 3-14 所示，具体说明见表 3-1。

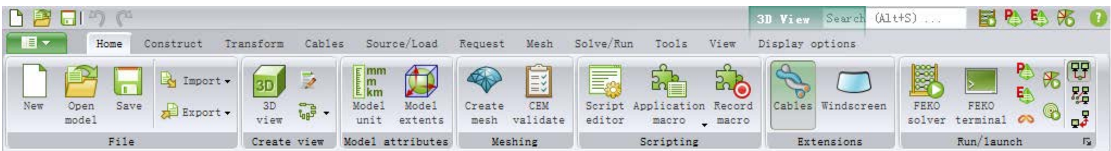


图 3-14 “Home”菜单中的各按钮

表 3-1 “Home”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
File（文件）	New	创建新工程文件（Ctrl+N）	Scripting（脚本）	Script editor	打开 LUA 脚本编辑器
	Open model	打开一个工程文件（Ctrl+O）		Application macro	打开集成的应用宏
	Save	保存当前工程文件（Ctrl+S）		Record macro	录制 LUA 宏
	Import	导入几何模型或网格[①]	Extensions（扩展）	Cables	激活或关闭 Cables 菜单
	Export	导出模型或网格[②]		Windscreen	激活或关闭 Windscreen 菜单
Create view（创建视图）	3D view	生成新的 3D 视图（Ctrl+3）	Run/launch（运行/启动）	FEKO solver	启动 FEKO 求解
		打开注释视图		FEKO terminal	打开 DOS 运行窗口
		打开非辐射网络原理图			启动 POSTFEKO（Alt+3）
Model attributes（模型属性）	Model unit	设定长度单位			启动 EDITFEKO（Alt+1）
	Model extents	设定容器大小，默认是 5E+02			启动预处理 PREFEKO（Alt+2）
Meshing（网格）	Create mesh	打开网格剖分对话框（Ctrl+M）			启动优化求解器-OPTFEKO（Alt+6）
	CEM validate	模型与设置检查			

① 可以导入的 CAD 格式。

② 可以导入的网格模型格式。

3）“Construct”菜单中的按钮如图 3-15 所示，具体说明见表 3-2。

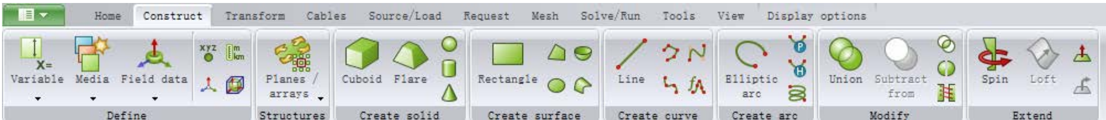


图 3-15 “Construct”菜单中的各按钮

表 3-2 “Construct”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Define（定义）	X= Variable	定义变量	Create curve（创建线模型）	Line	定义直线
	Media	定义各种材料			定义折线
	Field data	定义等效源			定义拟合曲线
	xyz	定义关键点			定义贝塞尔曲线
	m km	定义默认长度单位			定义函数曲线
		定义相对工作平面	Create arc（创建弧线）	Elliptic arc	定义椭圆弧线
		定义容器大小		P	定义抛物线
Structures（结构）	Planes / arrays	定义无限大平面和阵列		H	定义双曲线
Create solid（创建体模型）	Cuboid	创建几何方体			定义螺旋线
	Flare	定义开口喇叭	Modify（模型修正）	Union	模型布尔并操作
		定义球体		Subtract from	模型减法操作
		定义圆柱体			模型相交操作
		定义锥体			模型切割操作
Create surface（创建面模型）	Rectangle	定义矩形面			模型补缝操作
		定义多边形平面	Extend（模型扩展）	Spin	模型旋转成体或面操作
		定义椭圆面（包括圆面）		Loft	两条线放样成面操作
		定义抛物面			面法向拉伸成体操作
		定义非均匀有理 B 样条面			面沿线拉伸成体操作或线沿线拉升成面操作

● 定义变量：

每个新建工程已定义的默认 5 个变量是：常量 pi、绝对介电常数 eps0、绝对磁导率 mu0、光速 c0 和波阻抗 zf0。

变量的定义包括变量的名称（Name）、表达式（Expression）和注释（Comment）。

通常可以定义工作频率 freq，工作波长定义为 lam = c0/freq。如果长度的单位设置为毫米（mm），则工作波长需要定义为 lam=c0/freq/0.001（换算为毫米 mm）。

● 定义材料：

每个新建工程已定义的默认 3 种材料是：理想电导体（Perfect electric conductor）、理想磁导体（Perfect magnetic conductor）和真空（Free space）。

一个新建立的体模型，默认的材料属性为理想电导体（PEC），如果把体模型的 Region 设置为 Free Space，则表示该体模型为理想金属腔体。

FEKO 提供材料库（Material Library），包含常用的 90 多种材料，并具有在材料库中定义新材料、编辑已定义材料等功能。

FEKO 可以定义介质材料（Dielectric medium）、阻抗边界（Impedance sheet）、非理想金属材料（Metallic medium）、风窗玻璃层（Windscreen layers）和分层介质（Layered structures）等，如图 3-16 所示。

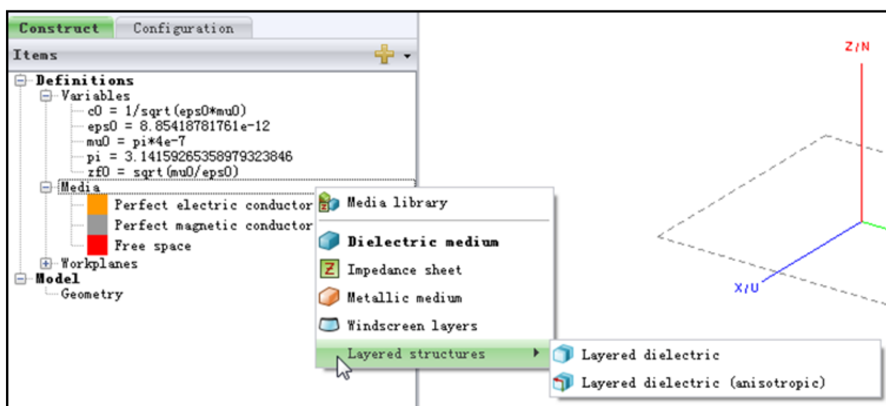


图 3-16　FEKO 可以定义的材料

● 定义等效源：

FEKO 提供丰富的发射源和接收天线等效方法。

FEKO 的发射源等效支持远场点源等效源（Far field）、口面近场等效源（Near field）和远场点源球面模式场等效源（Spherical modes）。

远场数据文件：可以直接读入 FEKO 生成的远场数据输出（.ffe）: Load field data from a FEKO（*.ffe）file；可以直接读入 ASCII 文本文件（.dat）：Load file data from an external data file，包含 6 列数据，其格式如下。

Theta Phi Mag(Etheta) Phase(Etheta) Mag(Ephi) Phase(Ephi)

第 1 列 Theta：角度从 0°～180°；

第 2 列 Phi：角度从 0°～360°；

第 4 列 Phase(Etheta)：取值从-180°～180°；

第 6 列 Phase(Ephi)：取值从-180°～180°；

第 1 列 Theta 与第 2 列 Phi：先变第 1 列 Theta 值，再变第 2 列 Phi 值。

可以直接读入 CST 远场数据文件(*.ffs): Load field data from a CST far field scan(*.ffs)，如图 3-17 所示。

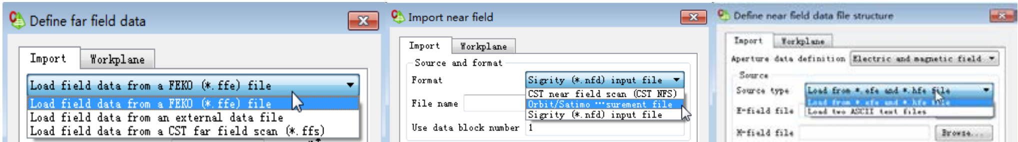


图 3-17　远场数据文件

口面近场数据文件：可以直接读入 FEKO 生成的近场数据输出(.efe,.hfe): Load from *.efe and *.hfe file；可以直接读入 ASCII 文本文件(.dat)：Load two ASCII text files，包含 9 列数据，其格式如下（以直角坐标系为例）。

#　X Y　Z Mag(Ex) Phase(Ex) Mag(Ey)　Phase(Ey)　Mag(Ez)　Phase(Ez)

可以直接读入测试数据文件：Orbit/Satimo ***measurement file。

可以读入专业高速电路软件 Cadence-Sigrity 仿真得到的数据文件：Sigrity (*.nfd) input file。

FEKO 的接收天线等效支持远场方向图等效（Rx for field antenna)、口面近场等效（RX near field antenna)、远场球面模式等效（RX spherical modes)，如图 3-18 所示。

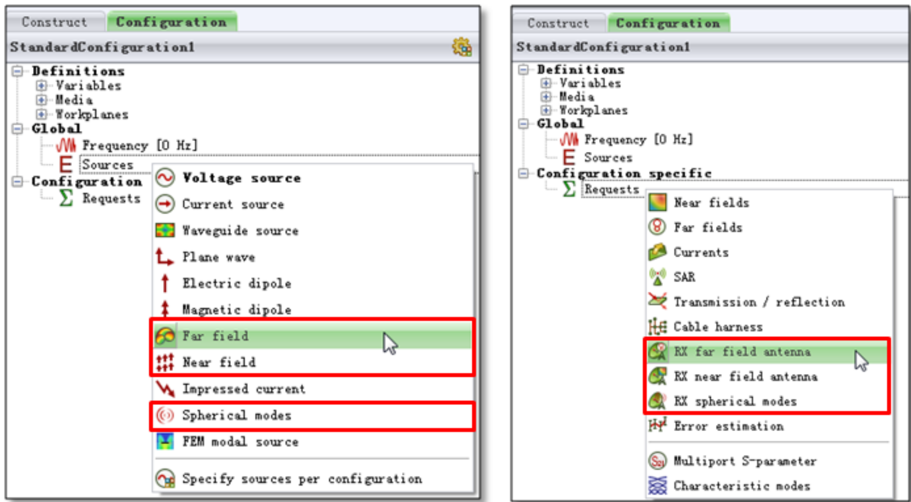


图 3-18　口面近场数据文件

- 定义无限大平面和阵列（见图 3-19）：

定义无限大地平面——Plane/ground。

理想电导体地平面——Perfect electric (PEC) ground plane at Z=0。

理想磁导体地平面——Perfect electric (PMC) ground plane at Z=0。

半空间均匀介质——Homogeneous half space in region Z<0。

平面格林函数——Planar multilayer substrate。

周期边界——Periodic boundaries。

线/平面阵——Linear/planar array。

柱面/环面阵——Cylindrical/circular array。

用户自定义阵列——Custom array element。

外部读入阵列文件——Import from file。

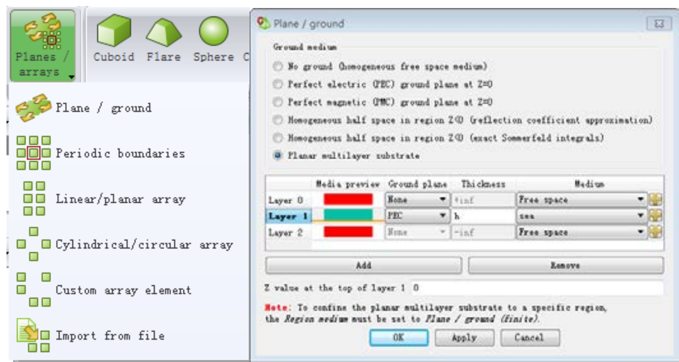


图 3-19　定义无限大平面和阵列

4）“Transform”菜单中的按钮如图 3-20 所示，具体说明见表 3-3。



图 3-20　“Transform”菜单中的各按钮

表 3-3　“Transform”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明
Copy（模型复制）	Copy (duplicate)	复制模型
	Original geometry	复制原始模型
	... and translate	复制平移
	... and rotate	复制旋转
	... and mirror	复制镜像
Transform（模型变换）	Translate	模型平移
	Mirror	模型镜像
	Rotate	模型旋转
	Scale	模型缩放
	Align	模型放置
Imprint（模型印记）	Project	模型投影
	Imprint points	在模型上投影点
Simplify（模型简化）	Simplify	模型冗余处理

面板	按钮	说明
Alter（模型改变）	Reverse normals	改变面元法向
	Convert to primitive	转换为原始模型
	Explode	模型爆炸
Assemblies（装配体）	Create	创建装配体
	Disassemble	释放装配体
	Move out	从装配体中移出
Repair（模型修复）	Repair part	修补模型中不同的部件
	Simplify part representation	简化模型中的部件
	Repair edges	修补模型中的棱边
	Repair and sew faces	修补模型中的面
	Remove small features	移除模型中的小特征
Rebuild（模型重构）	Fill hole	补孔洞

- 原始模型：如果一个模型中删除了一些面元，则原始模型就是包含了已删除面元的模型。
- 转换为原始模型：即删除模型建立的过程（如各种布尔操作等）。
- 模型修复：该功能需要对要处理的模型执行“Convert to primitive”命令。

5）“Cables”菜单中的按钮如图 3-21 所示，具体说明见表 3-4。

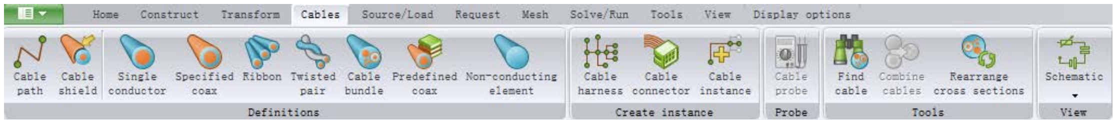


图 3-21 “Cables”菜单中的各按钮

表 3-4 “Cables”菜单中的各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Definitions（线缆定义）	Cable path	定义线缆走线	Create instance（创建线缆内部与信号的连接）	Cable harness	定义线缆拓扑
	Cable shield	定义线缆屏蔽层		Cable connector	定义线缆连接头
	Single conductor	定义单线线缆		Cable instance	定义线缆内部线缆连接与信号连接
	Specified coax	定义同轴线缆	Probe（探针）	Cable probe	线缆探针
	Ribbon	定义排线	Tools（线缆工具）	Find cable	查找线缆
	Twisted pair	定义双绞线		Combine cables	组合线缆
	Cable bundle	定义线缆束		Rearrange cross sections	调整线缆束截面排布
	Predefined coax	线缆模型库	View（视图）	Schematic	线缆网络原理图
	Non-conducting element	定义光缆（无导体）			

6）“Source/Load”菜单中的按钮如图 3-22 所示，具体说明见表 3-5。

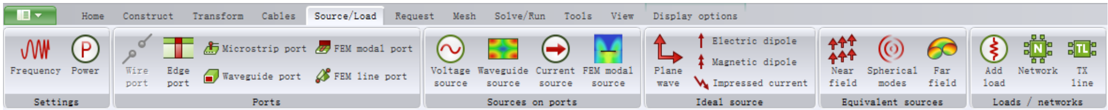


图 3-22 “Source/Load”菜单中的各按钮

表 3-5 “Source/Load”菜单中的各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Settings（通用设置）	Frequency	设定工作频率	Ideal source（理想点源）	Plane wave	平面波
	Power	设定功率源		Electric dipole	电偶极子
Ports（端口）	Wire port	线端口		Magnetic dipole	磁偶极子
	Edge port	棱边端口		Impressed current	外部电流
	Microstrip port	微带线端口	Equivalent sources（等效源）	Near field	口面近场源
	Waveguide port	波导端口		Spherical modes	球面模式点源
	FEM modal port	有限元模式端口		Far field	远场点源
	FEM line port	有限元线端口	Loads/networks（加载与非辐射网络）	Add load	阻抗加载
Source on ports（端口添加的激励类型）	Voltage source	电压源		Network	非辐射网络
	Waveguide source	波导激励源		TX line	传输线
	Current source	电流源			
	FEM modal source	有限元模式激励			

7）“Request”菜单中的按钮如图 3-23 所示，具体说明见表 3-6。

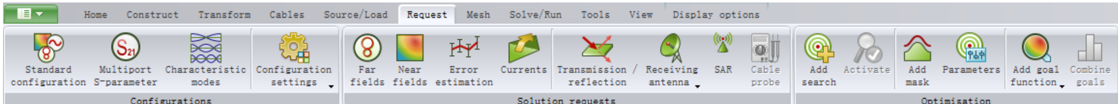


图 3-23 “Request”菜单中的各按钮

表 3-6 “Request”菜单中的各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Configurations（求解配置）	Standard configuration	标准求解设置	Solution requests（求解设置）	Receiving antenna	理想接收天线
	Multiport S-parameter	多端口 S 参数		SAR	电磁波能量吸收比
	Characteristic modes	特征模分析		Cable probe	线缆探针
	Configuration settings	求解配置设置	Optimisation（优化设置）	Add search	添加优化
Solution requests（求解设置）	Far fields	远场求解设置		Activate	激活优化
	Near fields	近场求解设置		Add mask	添加区间阈值
	Error estimation	网格误差评估		Parameters	优化参数设置
	Currents	电流求解设置		Add goal function	添加目标函数
	Transmission / reflection	透波率/反射率求解设置		Combine goals	组合目标函数

8）“Mesh”菜单中的按钮如图 3-24 所示，具体说明见表 3-7。

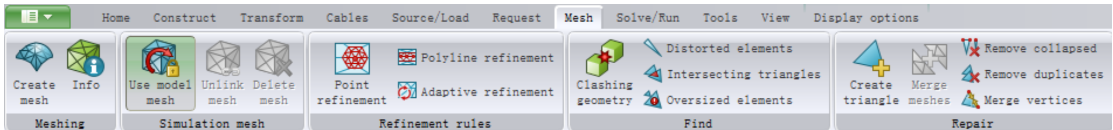


图 3-24 “Mesh”菜单中的各按钮

表 3-7 “Mesh”菜单中的各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Meshing（网格）	Create mesh	生成网格	Find（网格检查与查找）	Clashing geometry	查找几何冲突
	Info	显示网格信息		Distorted elements	失真单元
Simulation mesh（仿真网格）	Use model mesh	使用网格		Intersecting triangle	交叉三角形单元
	Unlink mesh	模型与网格分离		Oversized elements	过大单元
	Delete mesh	删除网格	Repair（修补网格）	Create triangle	创建三角形单元
Refinement rules（网格剖分规则）	Point refinement	点周边网格细化		Merge meshes	合并网格
	Polyline refinement	沿折线网格细化		Remove collapsed	移除破损网格
	Adaptive refinement	自适应网格细化		Remove duplicates	移除重复网格
				Merge vertices	合并单元结点

9）“Solve/Run”菜单中的按钮如图 3-25 所示，具体说明见表 3-8。

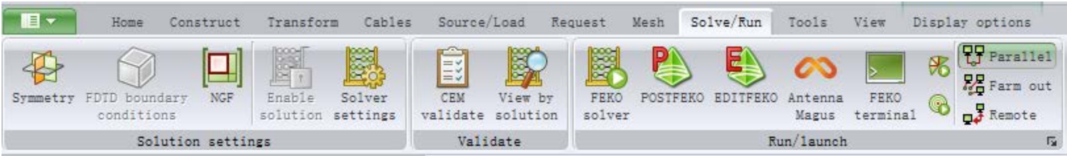


图 3-25 “Solve/Run”菜单中的各按钮

表 3-8 “Solve/Run”菜单中的各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Solution settings（求解设置）	Symmetry	设置模型和电/磁对称	Run/launch（运行与模块启动）	EDITFEKO	调用 EDITFEKO 模块
	FDTD boundary conditions	FDTD 边界条件		Antenna Magus	调用 AntennaMagus 模块
	NGF	域格林函数法（NGF）		FEKO terminal	启动 DOS 终端
	Enable solution	激活 CADFEKO 的求解设置			调用预处理 PREFEKO
	Solver settings	求解设置			调用优化器 OPTFEKO
Validate（验证）	CEM validate	模型、网格、算法、求解设置验证		Parallel	激活多核并行
	View by solution	求解参数在视图中显示		Farm out	激活其他计算机求解器进行优化计算
Run/launch（运行与模块启动）	FEKO solver	调用 FEKO 求解		Remote	激活调用远程计算机 FEKO 求解器
	POSTFEKO	调用 POSTFEKO 模块			启动并行求解详细设置选项

10）“Tools”菜单中的按钮如图 3-26 所示，具体说明见表 3-9。

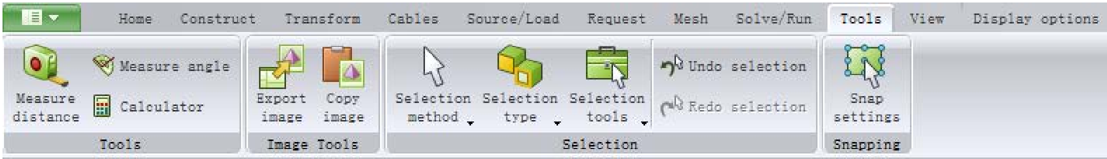


图 3-26 “Tools”菜单中的各按钮

表 3-9 “Tools”菜单中的各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Tools（工具箱）	Measure distance	测量距离	Selection（单元选择）	Selection type	选择类型：自动、体选、面选、边选等
	Measure angle	测量角度		Selection tools	选择工具
	Calculator	计算器		Undo selection	取消上一步选择操作

（续）

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Image Tools（图片工具）	Export image	导出图片		Redo selection	返回上一步选择操作
	Copy image	复制图片	Snapping（拾取）	Snap settings	拾取设置
Selection（单元选择）	Selection method	单元选择方法：点选、框选、多边形框			

11）“Display options”菜单中的按钮如图 3-27 所示，具体说明见表 3-10。

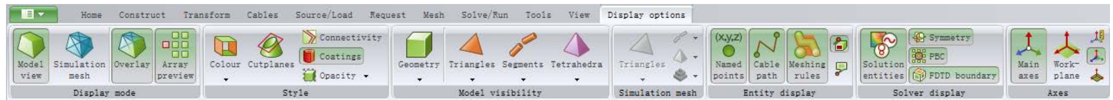


图 3-27 “Display options”菜单中的各按钮

表 3-10 “Display options”菜单中的各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Display mode（显示模式）	Model view	几何模型显示	Simulation mesh（仿真模型显示）	Triangles	三角形单元
	Simulation mesh	仿真模型显示			线单元
	Overlay	几何与仿真模型显示			四面体单元
	Array preview	阵列预显示			六面体单元
Style（风格）	Colour	颜色设置：单元法向、体材料、面材料、面法向材料等	Entity display（实体显示开关）	(x,y,z) Named points	关键点显示开关
	Cutplanes	切面视图		Cable path	线缆走线路径
	Connectivity	非连续面间孔缝显示开关		Meshing rules	网格剖分规则
	Coatings	涂敷显示开关			显示端口开关
	Opacity	几何模型透明度显示开关			显示激励源开关
Model visibility（模型显示设置）	Geometry	几何模型显示选项设置	Solver display（求解、边界条件显示）	Solution entities	求解设置显示开关
	Triangles	三角形单元显示选项设置		Symmetry	电/磁/几何对称开关
	Segments	线单元显示选项设置		PBC	周期边界开关
	Tetrahedra	四面体单元选项设置		FDTD boundary	FDTD 边界开关

3.2.2 模型与求解树形管理器

1）“Configurations”（求解配置树形管理器）：管理同一个工程同一个模型的不同求解

（如多端口 S 参数计算、每副天线单独工作的辐射方向图、多天线同时工作的辐射方向图、特征模等），如图 3-28 所示。

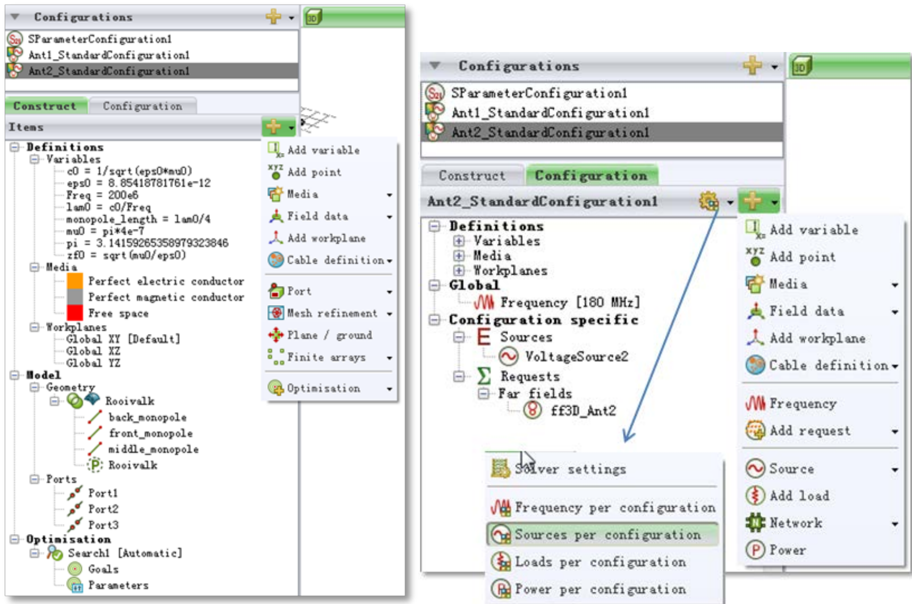


图 3-28　模型与求解树形管理器

2）“Construct”（模型树形管理器）：管理几何模型和各种定义（变量 Variables、材料 Media、工作平面 Workplanes）、端口以及优化设置（优化方法 Search method、优化目标 Goals 和扫描参数 Parameters），具体见表 3-11。

表 3-11　模型树形管理器

浮动对话框子菜单名称	说明	浮动对话框子菜单名称	说明
Add Variable	添加变量	Port	添加端口：线端口（Wire Port）、棱边端口（Edge Port）、波导端口（Waveguide Port）、微带线端口（Microstrip Port）、有限元模式端口（FEM Modal Port）、有限元线端口（FEM Line Port）
Add point	添加关键点	Mesh Refinement	添加网格加密规则：点周边网格加密（Point refinement），沿线周边区域网格剖分规则（Polyline refinement），自适应网格加密（Adaptive refinement）
Media	添加材料：从材料库中添加 Material Libray，介质材料（Dielectric Medium），表面阻抗（Impedance sheet），分层介质（Layered dielectric），各向异性分层介质（Layered dielectric），如（anisotropic），以及非理想金属（Metallic medium）	Plane/Ground	无限大地定义，包括多层格林函数
Field data	定义和导入远场或口面近场数据文件	Finite arrays	有限大阵列：线阵/面阵（Linear/Planar）、柱面/圆形阵（Cylindrical/Circular array）
Add workplane	添加工作平面	Optmisation	优化定义：优化方法（Add Search），添加 Mask，添加目标函数（Add goal function）
Cable definition	线缆定义：包括线缆走线（Cable Path）、屏蔽层（Cable Shield）、各种线型，如单线（Single）、双绞线（Twisted pair）、排线（Rabbion）、同轴线（Specified Coax）、线缆束（Cable Bundle）、同轴线缆库（Predefined Coax）等		

3）“Configuration”（求解设置树形管理器）：具体见表 3-12。

表 3-12 求解设置树形管理器

浮动对话框子菜单名称	说明	浮动对话框子菜单名称	说明
Solver settings（求解设置）	每个求解设置对应的工作频率定义（Frequency per configuration）	Frequency	工作频率定义
	每个求解设置对应的激励源设置（Source per configuration）	Add request（添加求解设置）	近场设置（Near Fields）； 远场设置（Far Fields）； 电流（Currents）； 电磁能量吸收比（SAR）； 传输系数/反射系数（Transmission/ reflection）； 线缆拓扑（Cable Harness）； 远场接收天线（RX far field antenna）； 近场接收天线（RX near field antenna）； 球面模式接收天线（RX spherical modes）； 误差估计（Error estimation）； 多端口 S 参数（Multiport S-parameter）； 特征模（Characteristic modes）；
	每个求解设置对应的阻抗加载（Loads per configuration）		
	每个求解设置对应的功率源（Power per configuration）		

3.2.3 3D模型视图窗口

3D 模型视图（见图 3-29）是 CADFEKO 非常重要的部分，用于直观显示已经建立的几何模型、网格和求解参数属性等：

- 支持模型的旋转（移动鼠标左键）、平移（Ctrl+鼠标左键滑动或按住鼠标中间滑轮并拖动鼠标）、缩放（滚动鼠标中间滑轮或 Shift+鼠标左键拖动）等。
- 通过选择显示选项菜单（Display options）中的切面视图（CutPlanes）来显示几何模型中的内部结构。
- 通过选择显示选项菜单中的颜色（Color）来用不同颜色显示几何模型面或体的不同属性（如面法向、面材料和体材料）。
- 显示求解设置的近场、远场、端口、激励、对称面（电/磁/几何）等。

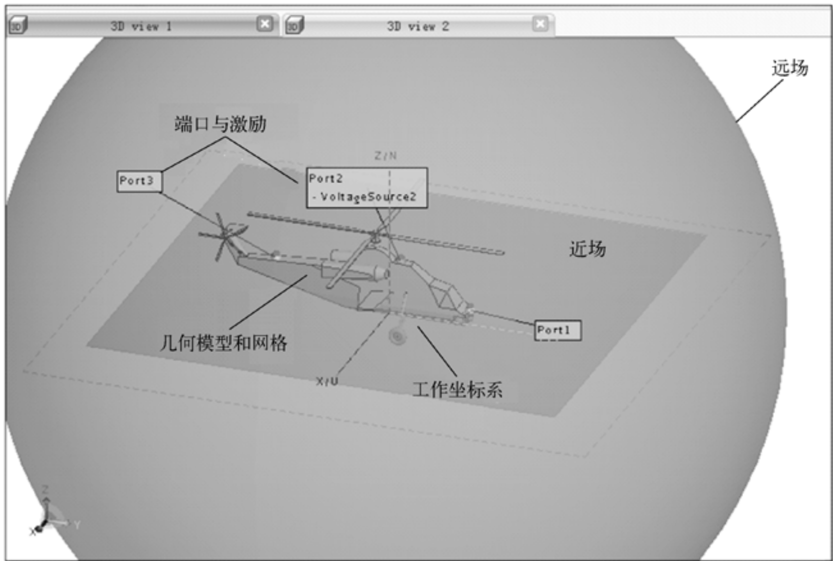


图 3-29 3D 模型视图

3.2.4 信息管理窗口

信息管理窗口（见图 3-30）会显示在 CADFEKO 中所有的操作信息，包括：

- 参量、介质材料、工作平面、关键点等的定义、删除和修改信息。
- 几何建模、材料属性定义与修改的信息。
- 求解参数的定义和修改信息。
- 计算方法的设定信息。
- 所有的报错信息。

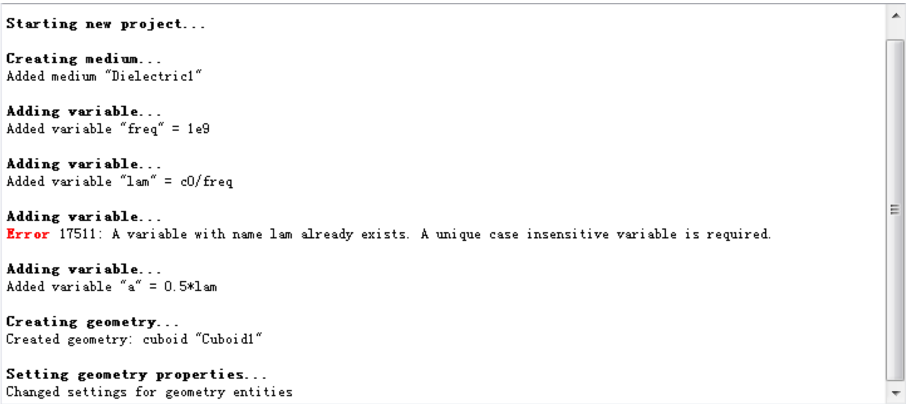


图 3-30 消息框显示

3.2.5 快捷工具条

快捷工具条如图 3-31 所示，具体说明见表 3-13。



图 3-31 快捷工具条

表 3-13 快捷工具说明

菜单	按钮	说明	菜单	按钮	说明
		录制宏开关	Selection（面选、体选）		选择方式：点选、矩形框选、多边形框选
Display（显示）		显示几何模型			选择类型：自动、体选、面选、棱边选
		显示网格模型			选择工具
		显示几何/网格模型			拾取方式设置
Tools（工具）		测量距离	Unit（长度单位）	Unit: m	设置长度单位
		测量角度			

3.2.6 主要的快捷键

全面的快捷键列表，可以参见 FEKO 自带的 User manual 第 266～269 页，这里只列出几种常用的快捷键，见表 3-14。

表 3-14　FEKO 中常用的快捷键

快捷键	功能	快捷键	功能
Ctrl + N	新建一个工程	F5	3D 视图的适中显示
Ctrl + S	保存当前工程	F1	启动帮助信息
Ctrl + O	打开一个工程	Alt+1	启动 EDITFEKO 模块
Ctrl + 3	打开一个 3D 视图	Alt+2	启动 PREFEKO 模块
Ctrl + M	打开网格划分对话框	Alt+3	启动 POSTFEKO 模块
Ctrl+Shift+M	采用默认设置快速生成网格	Alt+4	启动 FEKO 求解器
F2	对选中的元素（item）重新命名	Alt+6	启动 OPTFEKO 优化
F9	定义工作平面	Alt+8	启动 FEKO 的 DOS 终端

3.3　后处理模块——POSTFEKO

在完成了建模、网格离散矩阵求解之后，就可以从前处理模块 CADFEKO 中直接启动后处理模块 POSTFEKO 来显示计算的结果，并对计算结果进行处理获取工程中需要关注的各种工程参数，并生成计算报告。后处理 POSTFEKO 主界面如图 3-32 所示。

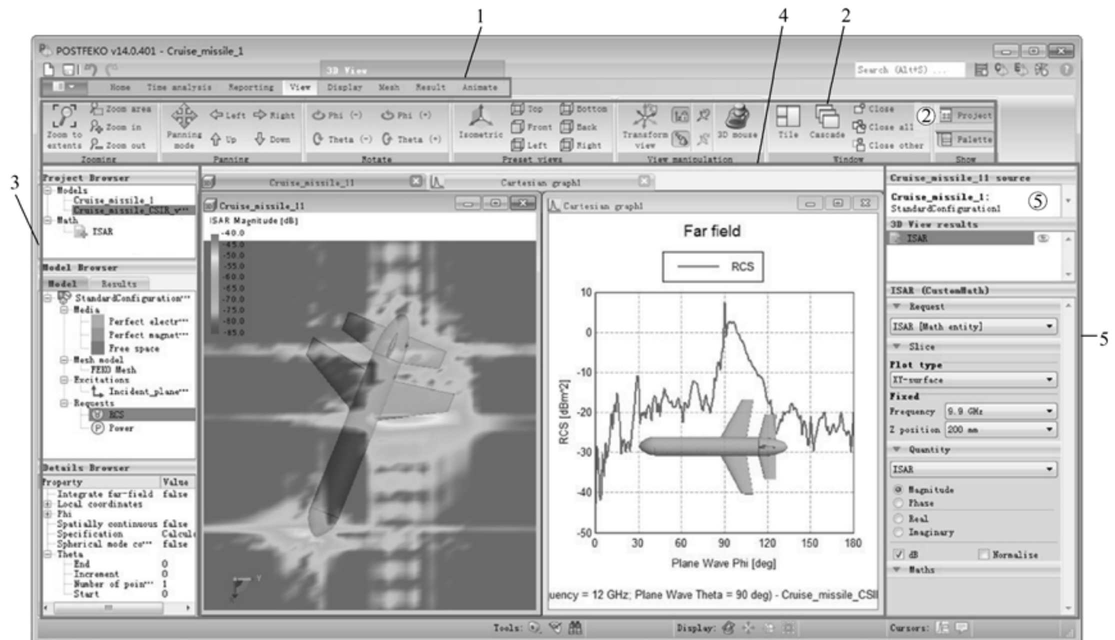


图 3-32　后处理 POSTFEKO 主界面

1—菜单栏　2—工具按钮　3—工程管理树形浏览器　4—3D 视图区域　5—工程参数控制面板

3.1 菜单与工具按钮集

1）“Home”菜单中的按钮如图 3-33 所示，具体说明见表 3-15。

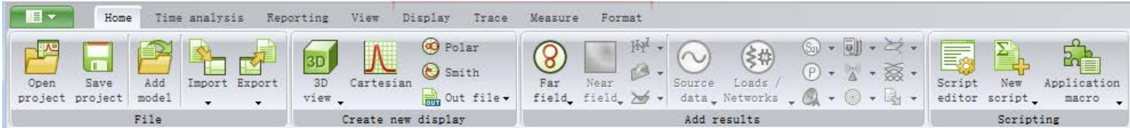


图 3-33 “Home”菜单中的按钮

表 3-15 “Home”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明
File（文件）	Open project	打开后处理工程文件（.pfs）
	Save project	保存后处理工程文件（.pfs）
	Add model	添加其他工程的模型和结果（.fek 和.bof）
	Import	读入外部数据：远场数据 ffe，口面近场数据（.efe 和.hfe），多端口 S 参数文件（.snp）和用户自定义数据（custom data file）等
	Export	导出计算结果数据
Create new display（创建显示类型）	3D view	添加 3D 视图
	Cartesian	添加直角坐标系
	Polar	添加极坐标系
	Smith	添加 Smith 圆图
	Out file	打开文本结果文件（.out）
Scripting（脚本）	Script editor	打开脚本编辑器
	New script	新脚本快速生成
	Application macro	脚本宏读入
Add Results（添加计算结果）	Far field	显示远场
	Near field	显示近场
Add Results（添加计算结果）		误差评估
		显示线/面电流
		显示射线
	Source data	显示激励源信息：阻抗、反射系数等
	Loads / Networks	阻抗和非辐射网络相关结果
		多天线隔离度显示
		显示各种功率
		理想接收天线接收功率
		线缆端口探针、Spice 电路接收电压/电流
		电磁能量吸收比（SAR）
		优化参数显示
		显示反射系数/透射系数
		显示特征模参数
		导入脚本生成数据

2）“Time analysis”菜单中的按钮如图 3-34 所示，具体说明见表 3-16。

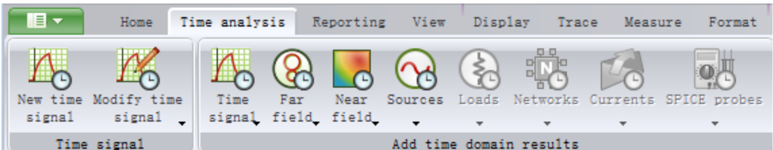


图 3-34 “Time analysis”菜单中的按钮

表 3-16 “Time analysis”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Time signal（时域波形）	New time signal	定义时域信号	Add time domain results（添加时域结果）	Sources	显示时域激励波形
	Modify time signal	修正时域信号波形		Loads	显示加载阻抗上的时域电压波形
	Time signal	选择时域信号		Networks	显示流过 Networks 的时域信号波形
Add time domain results（添加时域结果）	Far field	显示远场电场时域波形		Currents	显示电流时域波形
	Near field	显示近场电场/磁场时域波形		SPICE probes	显示 SPICE 探针上的时域波形

3）“Reporting”菜单中的按钮如图 3-35 所示，具体说明见表 3-17。

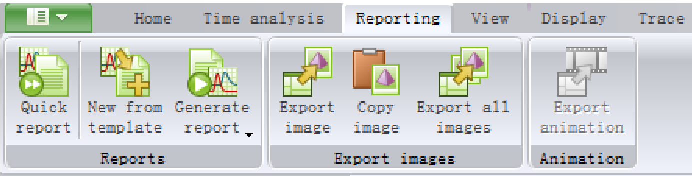


图 3-35 “Reporting”菜单中的按钮

表 3-17 “Reporting”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Reports（报告）	Quick report	快速生成报告	Export images（导出图片）	Export image	导出图片
	New from template	基于模板生成报告		Copy image	复制图片
	Generate report	选择模板生成报告		Export all images	导出所有的图片
			Animation（动画）	Export animation	导出动画

4）“Display”菜单中的按钮（3D 显示）如图 3-36 所示，具体说明见表 3-18。

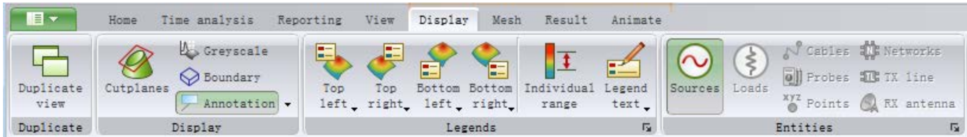


图 3-36 “Display”菜单中的按钮（3D 显示）

表 3-18 “Display”菜单中各按钮（3D 显示）的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Duplicate（复制）	Duplicate view	复制 3D 视图	Legends（图例标尺显示）	Top left	左上角添加
Display（显示）	Cutplanes	创建切面		Top right	右上角添加
	Greyscale	灰色显示 3D 结果		Bottom left	左下角添加
	Boundary	显示边界		Bottom right	右下角添加
	Annotation	3D 结果标注		Individual range	纵坐标区间设置
				Legend text	图例标题设置

5）“Display”菜单中的按钮（2D 显示）如图 3-37 所示，具体说明见表 3-19。

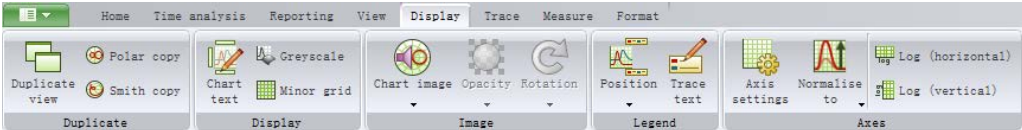


图 3-37 “Display”菜单中的按钮（2D 显示）

表 3-19 “Display”菜单中各按钮（2D 显示）的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Duplicate（复制）	Polar copy	极坐标复制	Image（图片设置）	Chart image	2D 曲线插入 3D 模型
	Smith copy	Smith 圆图复制		Opacity	3D 模型透明度
Display（显示）	Chart text	2D 曲线图页眉、图页脚、纵坐标/横坐标标题显示设置		Rotation	3D 模型旋转
	Minor grid	显示坐标子网格	Axes（坐标轴显示设置）	Axis settings	坐标系详细设置
Legend（图例显示）	Position	设置图例显示位置		Normalise to	结果归一化
	Trace text	显示图例的文本		Log (horizontal) Log (vertical)	对数坐标系（水平/垂直）

6）“Measure”菜单中的按钮如图 3-38 所示，具体说明见表 3-20。

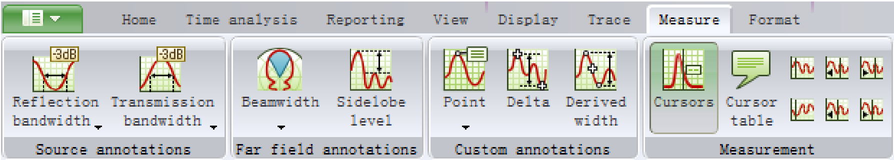


图 3-38 “Measure”菜单中的按钮

表 3-20 “Measure”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Source annotations（激励源标注设置）	Reflection bandwidth	工作带宽	Custom annotations（用户自定义标注设置）	Delta	2D 坐标图两点之间的差值
	Transmission bandwidth	−3dB、−10dB 和−15dB 工作带宽		Derived width	在两点之间添加标注
Far field annotations（远场标注设置）	Beamwidth	3dB 主瓣宽度，第一零深宽度和两个零深宽度	Measurement（度量）	Cursors	添加游标
	Sidelobe level	SLL 第一副瓣电平		Cursor table	添加游标表格
Custom annotations（用户自定义标注设置）	Point	全局最小、最大、指定角度或任意位置等			指定游标位置

7）“Format”菜单中的按钮如图 3-39 所示，具体说明见表 3-21。

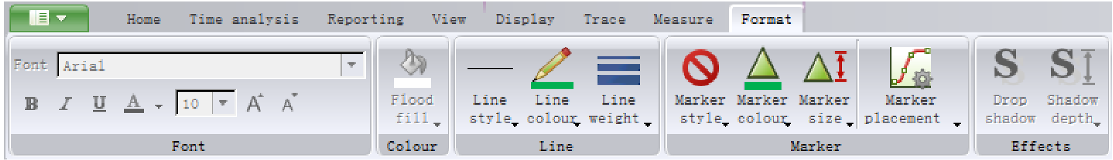


图 3-39 “Format”菜单中的按钮

表 3-21 “Format”菜单中各按钮的说明

面板	按钮	说明	面板	按钮	说明
Line（线设置）	Line style	线样式	Marker（标记设置）	Marker style	标记符样式
	Line colour	线颜色		Marker colour	标记符颜色
	Line weight	线粗细		Marker size	标记符大小
				Marker placement	标记符放置类型

3.2 工程与树形管理器

工程与树形管理器是从.fek 文件读入的关于工程文件的网格模型、求解设置、优化等信息，包括工程浏览器（Project Browser）、网格模型浏览器（Model Browser）和详细信息浏览器（Details Browser）等，如图 3-40 所示。

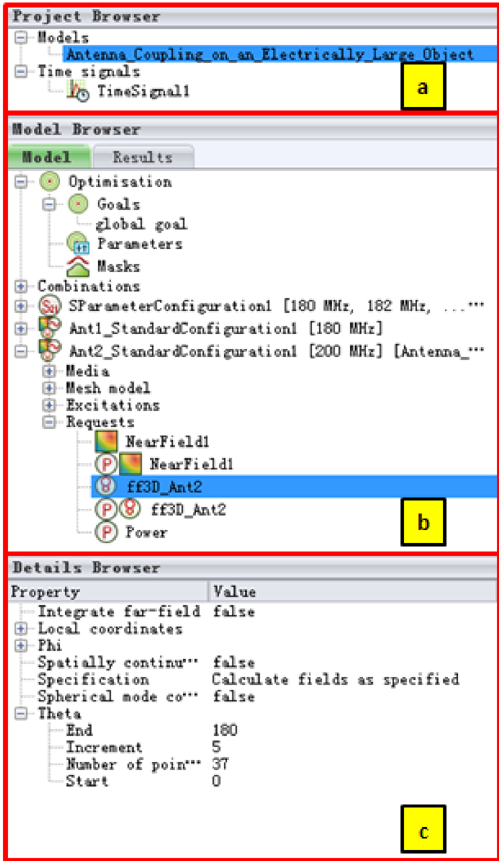


图 3-40　工程与树形管理器

3.3 3D/2D结果视图显示

3D 模型视图是 POSTFEKO 非常重要的部分，用于直观显示 3D 网格模型、3D 云图/2D 曲线和动画等计算结果信息，如图 3-41 所示。

- 显示 3D 云图，如远场方向图、近场云图、动画等。
- 显示 2D 直角坐标系、极坐标系、Smith 圆图。
- 丰富的显示参数，如增益、方向性系数、极化、功率、效率、特征模、反射率/透波率、SAR、RCS、电场强度、磁场强度、电压、电流、反射系数、驻波比、阻抗等。

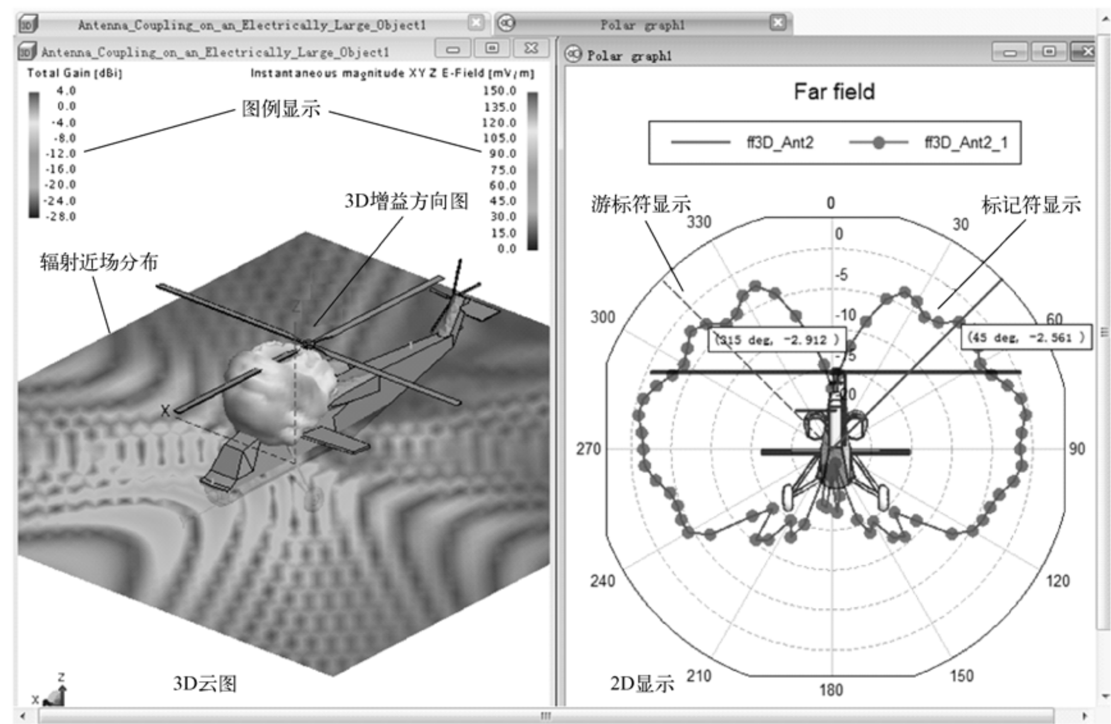


图 3-41　3D/2D 结果视图显示

3.3.4 计算参数设置面板

在 3D 视图的右侧是计算参数设置面板，可以选择不同工程、不同参数、不同极化、线性值/dB 值等，如图 3-42 所示。

1）3D 视图显示时，选择工程文件或不同的求解配置。

2）3D 视图显示的结果选择有远场、近场、电流等，对应 CADFEKO 中的 Request 部分的设置。

3）3D 视图显示时选择 CADFEKO 中设置的 Request。

4）3D 视图显示时选择显示类型：3D surface、Phi cut 或 Theta Cut。

5）3D 视图显示时选择工作频率点。

6）3D 视图显示时选择显示工程参数，不同参数，对于矢量参数，分量会不同。如果显示的是 RCS，那么分量会包括模值（Total）、Theta 分量、Phi 分量、路德维格同极化（Ludwig III(Co)）、路德维格交叉极化（Ludwig III (Cross)）、左旋极化（LHC）、右旋极化（RHC）、dB 值/线性值、归一化值（Normalise）等。

7）2D 曲线显示时选择要显示的曲线（CADFEKO 中设置的 Request）。

8）2D 曲线显示时显示工程文件。

9）2D 曲线显示时显示横坐标要显示的参量，可以是工作频率、Theta、Phi 等。

Theta(wrapped): 通常在设置远场计算时，theta 的默认设置区间是 0～180，Phi 的默认设置区间是 0°～360°，该设置就是要把 theta 在-180°～180°区间内的值都显示出来。

10）2D 曲线显示时显示的参量（纵坐标）。

11）2D 曲线显示时参量的数学运算。

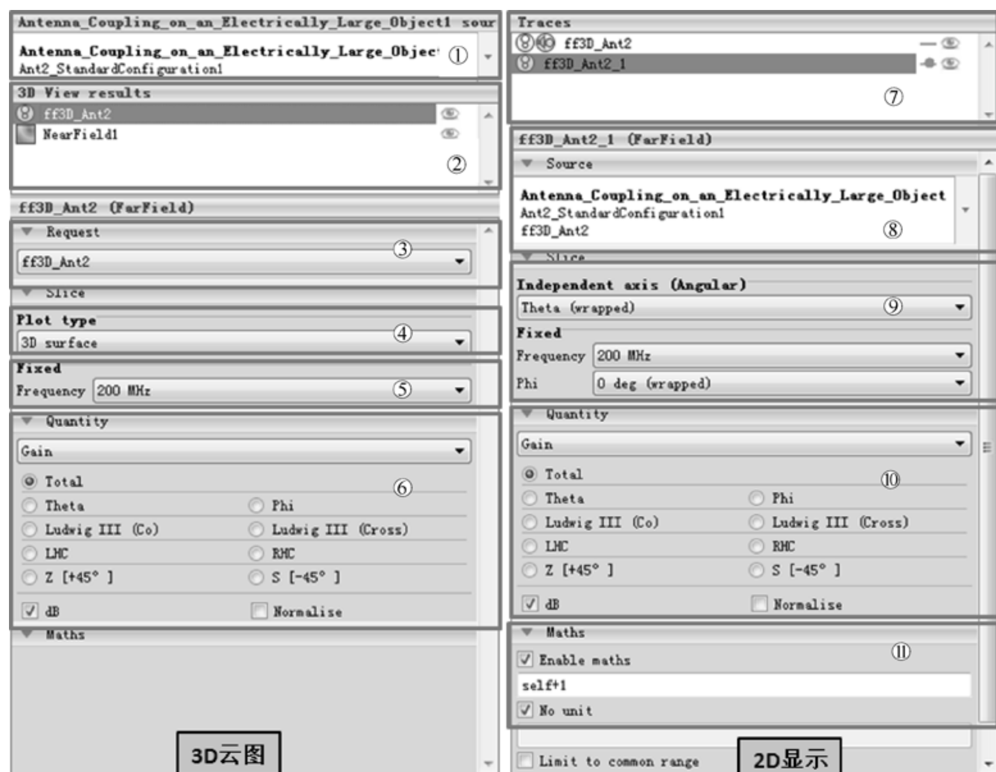


图 3-42　计算参数设置面板

3.4　命令流脚本编辑器EDITFEKO

该模块属于 FEKO 的高级命令流脚本编辑器，区别于 CADFEKO 和 POSTFEKO 中的 LUA 脚本。CADFEKO 中的 LUA 脚本主要用于 CADFEKO 中所有操作所完成的功能，包括几何建模、编辑和网格的划分、各种电参量（工作频率、激励、加载、近场、远场、电流等）的求解设置。LUA 脚本的功能已经逐步替代 EDITFEKO 中的脚本，POSTFEKO 中的 LUA 脚本主要用于计算结果的处理。关于 LUA 脚本的内容，可以参考 FEKO 自带的英文版用户手册，初级使用者可以参考本书的 4.5.2 节。

EDITFEKO 中的脚本支持部分脚本建模功能，支持计算方法选择设置、各种计算参数的设置等，在 CADFEKO 中建立了工程文件且保存后，均会自动生成扩展名为.pre 的脚本文件，对于命令流的高级设置可以在 EDITFEKO 中完成。所以，要应用 EDITFEKO 进行高级应用，可以在 CADFEKO 完成操作之后，再进入 EDITFEKO 来进行高级设置，而无须从头自己写脚本。

EDITFEKO 的启动也很简单，在 CADFEKO 中，单击 EDITFEKO 的快捷图标按钮或按〈Alt+1〉快捷键均可打开 EDITFEKO 工作界面，如图 3-43 所示。

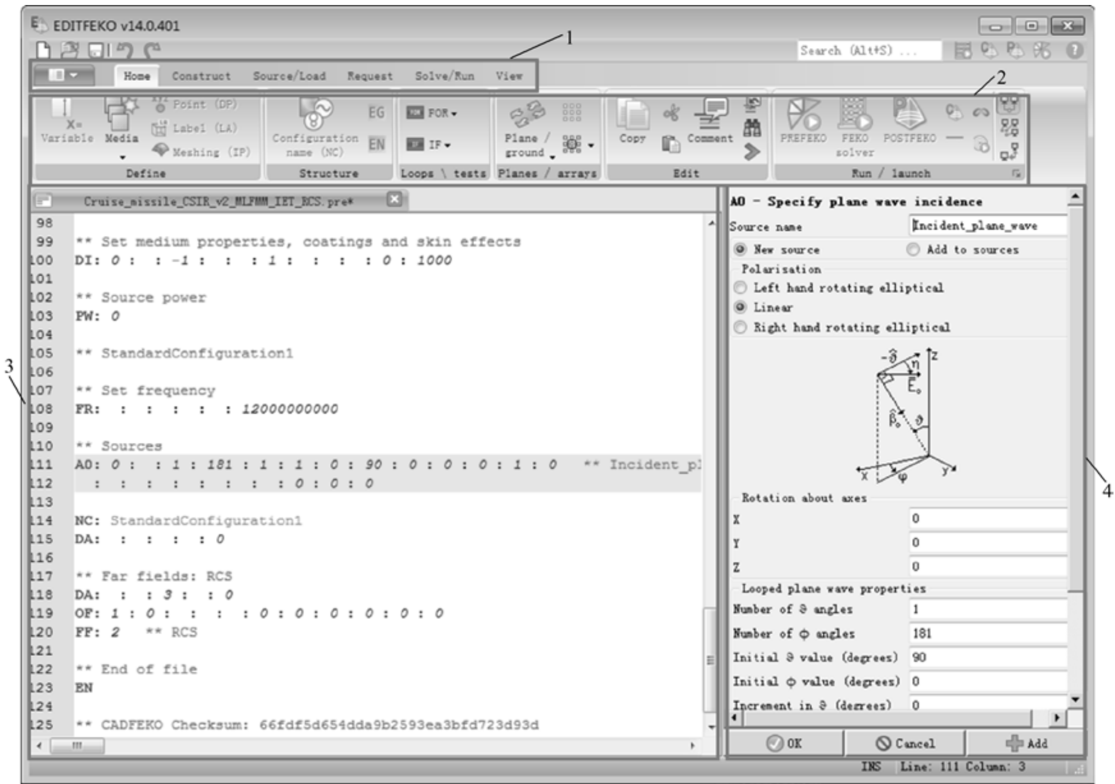


图 3-43　EDITFEKO 工作界面

1—菜单栏　2—工具按钮集　3—脚本编辑区域　4—命令函数控制面板

EDITFEKO 工作界面包含了 4 个主要的部分，即菜单栏、工具按钮集、脚本编辑区域和命令函数控制面板等。

3.4.1 脚本编辑区域

EDITFEKO 脚本编辑器简单易用，结构条理清晰，支持：

1）定义参数，以#号开头，格式如#freq、#lam 等，默认情况下，在 CADFEKO 中定义的参量可以直接使用，参量名称前要加#号。

2）注释行用绿色显示，以“**”开头。

3）主要函数（命令卡）以紫色字体显示，位于每一行的开头。

4）函数的放置位置是有规律的，例如：

- EG 函数卡上边的部分关于模型导入（IN 函数）、长度单位的缩放（SF 函数）、算法的设置等。
- EG 函数卡下边的部分关于材料定义（DI 函数）、电参数的定义，包括工作频率（FR 函数）、激励（A0、A1、AW、AE 等）、远场定义（FF 函数）、近场定义（FE 函数）等。

5）函数的参数之间以“：”号来分割，可以参数化。

6）支持 For…Next 循环和 IF…ELSE…END IF 语句，只能同时位于 EG 上边或 EG 下边。

7）在 EDITFEKO 部分可以启动 FEKO 求解。

关于 EDITFEKO 各个命令函数正确的放置位置，很难用一句话来说清楚，而绝大多数的工作是不需要用到 EDITFEKO 的，如果对 EDITFEKO 感兴趣，建议的学习方法是查看 FEKO 自动生成的脚本：在 CADFEKO 中单击需要用到的设置，保存后自动生成 EDITFEKO 脚本，打开 EDITFEKO 查看脚本，在需要修改的函数命令中对其进行高级设置。

3.4.2 命令函数控制面板

在 EDITFEKO 脚本编辑器中，如何建立新的命令或编辑某一行命令呢？方法如下：

1）把光标定在某一行，如 A0 一行，按〈F1〉键，会在右侧弹出该命令函数（如 A0）的设置控制面板，可详细设置该函数需要的输入，可以参数化，参量前边要加“#”号。

2）如果要定义一个新的函数命令卡，如远场设置卡，可以在脚本命令的结束行、EN 函数命令卡的上边正确的位置输入“FF”，按〈F1〉键，会在右侧弹出 FF 函数的详细设置控制面板。

3.4.3 常用命令函数的说明与应用

1. EDITFEKO常用命令函数（见表 3-22）

表 3-22　EDITFEKO 常用命令函数

序号	函数命令卡	功能描述
1	RM	网格的粗化和细化操作，是针对 CADFEKO 进行网格剖分后生成的.cfm 网格文件进行再剖分； 该命令卡多应用于网格数很大的问题，使用方法是：在 CADFEKO 先生成一个粗一些的网格，再在 EDITFEKO 用 RM 进行细化剖分，RM 应该位于 IN 卡的上边
2	SF	长度单位的缩放，设置该函数命令之后，后边用到的所有与长度有关的数值或变量都会自动缩放，即所有与长度有关的数值或变量乘以 SF 函数中设定的值得到的新数值以米为单位，所以： ① 如果在 CADFEKO 中设定的长度单位为 mm（毫米），那么自动生成的文件.pre 会自动生成 SF 函数命令，其参数值为 0.001； ② 如果在 CADFEKO 中采用的长度单位为 m（米），则在生成的.pre 文件中将不会包含 SF 函数命令
3	IN	默认情况下，导入的是 CADFEKO 自动生成的网格文件.cfm, 并且读入 CADFEKO 中定义的变量、关键点、网格中的线单元、三角形单元或四面体单元等，这些选项可以选择是否读入；也可以采用该函数命令卡来读入其他格式的网格文件，如.nas 和.stl 等
4	DP	定义点，如用 AW 命令函数定义波导激励时，需要定义 3 个点来形成两个矢量
5	TG	定义模型的复制（Copy）、平移（Translate）、旋转（Rotate）、缩放（Scale）等
6	FM	设置多层快速多极子算法求解器
7	PO	设置物理光学/大面元物理光学法求解器
8	UT	设置射线几何光学法（RL-GO）/一致性绕射法（UTD）求解器
9	EG	几何模型输入的结束函数，包括网格信息的输出控制、最大结点间距分辨率、单精度/双精度等
10	PS	控制数据结果的输出设置
11	CG	设置预条件和求解器设置
12	DI	设置材料名称和电参数
13	A0	设置入射平面波激励
14	A1	设置线端口的电压源激励

（续）

序号	函数命令卡	功能描述
15	AE	设置棱边端口的电压源激励
16	AW	设置波导端口的波导激励或同轴馈电
17	AR	设置远场点源激励
18	AP	设置口面近场源激励
19	AS	设置球面模式远场点源激励
20	PW	设置输入功率
21	NC	生成求解配置：StandardConfiguration，可以支持多个
22	DA	结果输出其他设置
23	OF	远场、近场数据计算的附加选项设置
24	OS	设置线电流、面电流求解
25	FF	设置远场计算
26	FE	设置近场计算
27	SP	设置 S 参数计算
28	EN	脚本命令流的结束符

2. EDITFEKO常用语法与函数说明及应用

1）变量的定义与举例。

以“#”号开头，可以包含数字和字符，不区分大小写，可以定义表达式：

```
#2pi = 2*#pi
#vara = 1 + sqrt(2)
#varb = #vara * 2.3e−2 * (sin(#pi/6) + sin(rad(40)) + #vara^2)
#sum = #vara+#varb
```

2）数组的定义与举例。

可以定义数组，以“#”号开头，带“[]”，方括号内部的数字代表数组的维数，例如：

```
#am_0[3*#i+ceil(#r[2])]
```

可以支持通过循环来为数组赋值：

```
!!for #i = 10 to 20
#array_a[#i] = 3*#i−10
#array_b[−#i] = 0
!!next
```

3）For/Next 循环的使用。

关键词 For 和 Next 以“!!”符号开头，完整的定义如下：

```
!!for #var = #start to #end step #delta
!!next
```

下面的例子是通过循环来定义多个点，点的名称为 P1、P3、P5……，例如：

```
EG: 1 : 0 : 0 :   :   : 1e−6 :   :   :   :   :   : 1
```

```
** Loop for the Point define
!!for #i= 1 to 10 step 2
DP: P#i
** End of loop
!!next
EN
```

也支持多层循环：

```
#end = 3+sin(4)
!!for #x1 = sqrt(5) + 2*3 to 2*#end step -#end/10
!! for #x2 = 1.23 to 2*#x1 ** this is the inner loop
#x3 = #x1 + #x2
DP …
… (更多命令)
!! next
!!next
```

4）IF/ELSE/ENDIF 结构的使用。

关键词 IF、ELSE 和 ENDIF 以“!!”符号开头，完整的定义如下：

```
!!if #a > 5 then
…
!!endif
```

或

```
#l = (#a+5 > 21) and (#a < 100)
!!if ( (3*#a+5 >= #x/2) and not(#l) ) then
…
!!else
!! if (sin(#x/10) > 0.5) then
…
!! else
…
!! endif
!!endif
```

5）Exit 命令的使用。

采用 Exit 命令可以停止一个执行，下例表示当#a < 2*#b 时，退出，示例代码如下：

```
!!if #a < 2*#b then
!! exit
!!endif
```

6）Print 命令的使用。

采用 Print 命令可以输出参数值、字符串信息、错误信息等，例如：

!!print：输出信息到屏幕

!! print_warning：输出警告信息到屏幕

!!print_error：与!!print_warning 相似，输出错误信息到屏幕

!!print_to_out：FEKO 运行时，把相关信息输出到一个日志文件中

```
!!print "2*#b = ", 2*#b
!!if #a < 2*#b then
!! print_error "The value of #a is too small:", #a, " (exiting now)"
!! exit
!!endif
!!print_to_out "This run was done with #b = ", #b
```

7）内置函数的使用，具体见表 3-23～表 3-25。

表 3-23　三角函数集

函数名称	功能说明
SIN()	正弦函数：参数以弧度为单位，如 sin(0.5*#pi)
COS()	余弦函数：参数以弧度为单位，如 cos(#pi/3)
TAN()	正切函数：参数以弧度为单位
COT()	余切函数：参数以弧度为单位
ARCSIN()	反正弦函数：得到弧度值
ARCCOS()	反余弦函数：得到弧度值
ARCTAN()	反正切函数：得到弧度值
ATAN2()	反正切函数：有两个参数，如 atan2(#y,#x)，得到 arctan(#y/#x)，结果取值范围为-pi ~ pi
ARCCOT()	反余切函数
SINH()	双曲正弦函数
COSH()	双曲余弦函数
TANH()	双曲正切函数

表 3-24　杂项函数集

函数名称	功能说明
SQRT()	开方函数
LOG()	以 10 为底的函数
LN()	自然对数函数
EXP()	指数函数
ABS()	取绝对值
DEG()	弧度转换为度
RAD()	度转换为弧度
STEP()	阶跃函数：X≤0 时取 0，X>0 时取 1
CEIL()	求不小于给定实数的最小整数
FLOOR()	向下取整函数
MAX()	取最大值函数，max(#a,#b)：取#a 和#b 中的大值
MIN()	取最小值函数，min(#a,#b)：取#a 和#b 中的小值
FMOD()	取余函数，包含两个参数：fmod(#a,#b)，取#a/#b 的余数
RANDOM()	随机函数，取 0～1 之间的任意值

表 3-25　取坐标值函数集

函数名称	功能说明
X_COORD()	取 DP 定义的点的 x 轴坐标值
Y_COORD ()	取 DP 定义的点的 y 轴坐标值
Z_COORD ()	取 DP 定义的点的 z 轴坐标值

下边的例子实现返回 PNT01 点的 x 轴坐标值，返回值为 1.234，代码如下：

```
DP PNT01 1.234 0.4567 #z
#x = x_coord("PNT01")
```

8）文件读取函数的使用。

函数 fileread()实现从 ASCII 文本文件中读取数据，使用格式如下：

```
fileread("Filename", Line, Column)
```

第 1 个参数是文件名；第 2 个参数是行；第 3 个参数是列。

下面的例子首先说明阻抗文件的存储格式，包含 3 列数据，文件保存为“datafile.dat”：

```
Frequency in MHz Re(load) in Ohm Im(load in Ohm)
100 22.54 -12.56
150 25.07 -6.54
200 27.42 0.23
```

利用函数 fileread()从文件“datafile.dat”中读取数据：

```
#numfreq = 3 ** Number of frequencies
!!for #i = 1 to #numfreq
** Define the frequency (conversion from MHz to Hz)
#freq = 1.0e6*fileread("datafile.dat", #i+1, 1)
FR:   :   :   :   :   : #freq
** Define the load
#Zr = fileread("datafile.dat", #i+1, 2)
#Zi = fileread("datafile.dat", #i+1, 3)
LZ: Port1 :   :   : 0 : 0 : #Zr : #Zi      ** 0
** Computations …
!!next ** End of frequency loop
```

3.5　相对工作平面（Workplane）的应用

3.5.1　何时用到Workplane

✓ 建立模型

- 相对工作坐标系

✓ 模型切面视图-Cutplanes

✓ 定义激励源-定义源放置位置

- 平面波定义——Plane wave。
- 点电偶极子——Electric dipole。
- 点磁偶极子——Magnetic dipole。
- 理想点源——Radiation pattern。
- 口面近场——Aperture field。
- 外部电流注入——Impressed current。
- 球面模式场——Spherical modes，如图 3-44 所示。

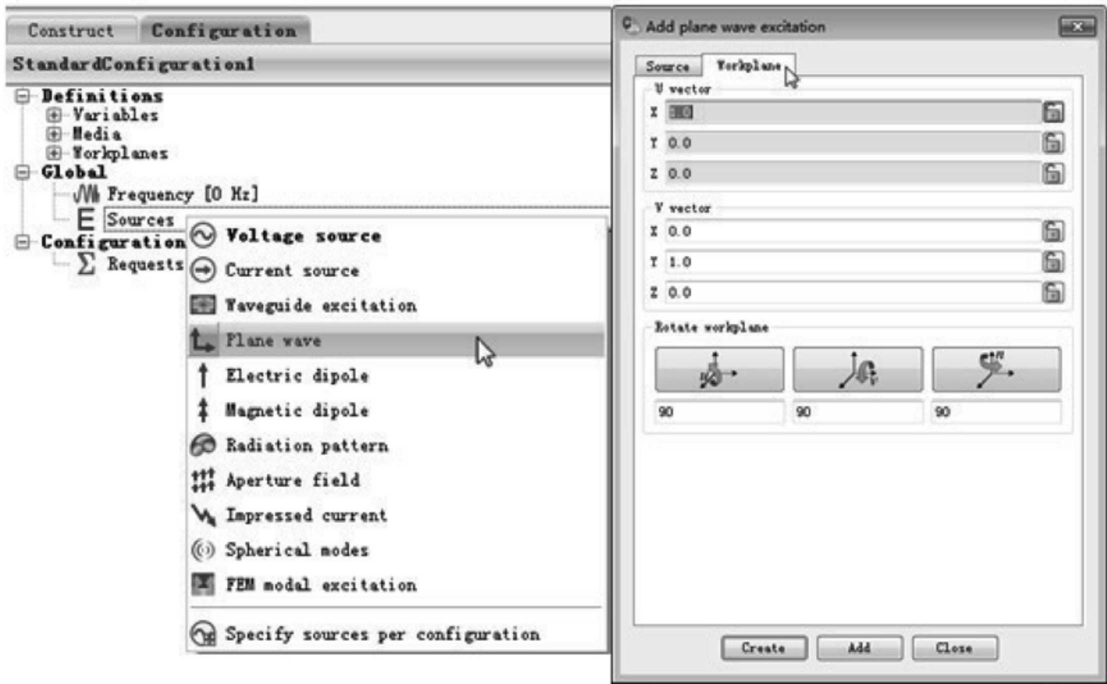


图 3-44　基于 Workplane 定义激励源

设置如下求解参数：

- 近场求解——Near fields。
- 远场求解——Far Fields。
- 理想点源接收——RX far field antenna。
- 理想口面场接收——RX near field antenna。
- 理想球面模式场接收——RX spherical modes，如图 3-45 所示。

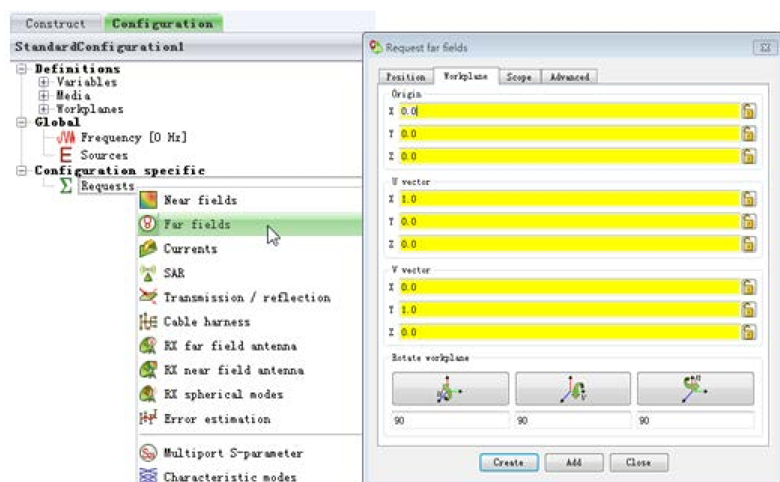


图 3-45　基于 Workplane 定义求解参数

3.5.2　定义Workplane

新建立的工程包含以下 3 个工作坐标系：

- Global XY [Default]。
- Global XZ。
- Global YZ。

默认的工作坐标系是 Global XY。

CADFEKO 建立相对工作平面的方法如下：

1）按〈F9〉键。

2）在“Construct”菜单中，单击“Add workplane”按钮。

3）在左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选中“Workplanes”结点，单击鼠标右键，选择“Add workplane”选项，如图 3-46 所示。

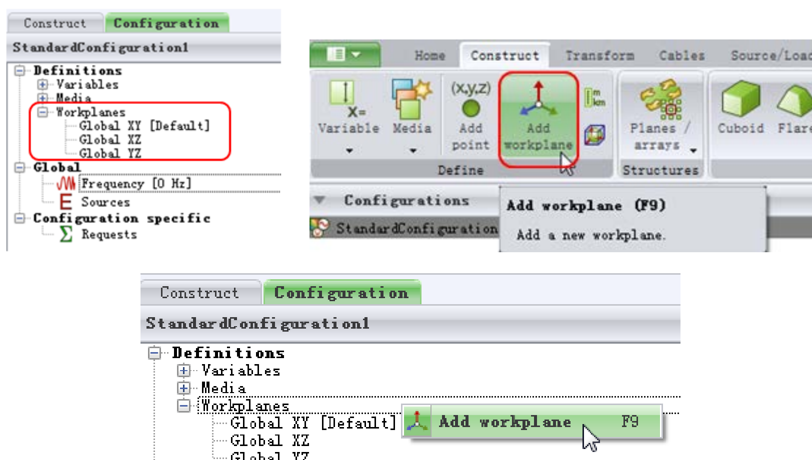


图 3-46　Workplane 的定义方法

任何一个工作坐标系都由 3 个必备的要素来决定（见图 3-47）：

1）该坐标系的中心位置（Origin），相对于全局坐标系的。

2）两个相互垂直的矢量，即 U vector 和 V vector。

相对工作坐标系表示为：UVN。

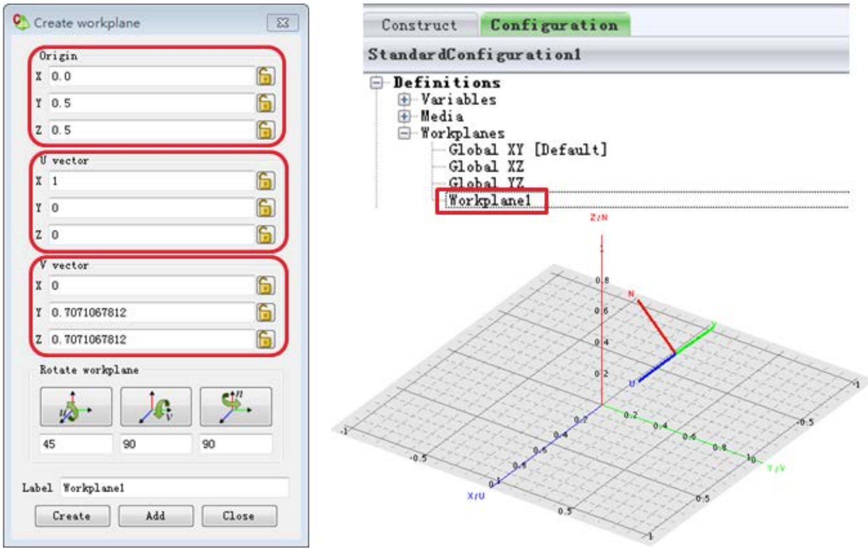


图 3-47　Workplane 的基本要素

拾取功能（Snapping）的应用：按住〈Ctrl + Shift〉组合键，使用鼠标左键进行拾取，如几何模型的关键点、网格的结点、工作平面的网格点、定义的关键点。

定义工作平面时，结合 Snapping 功能，应用更方便，如图 3-48 所示。

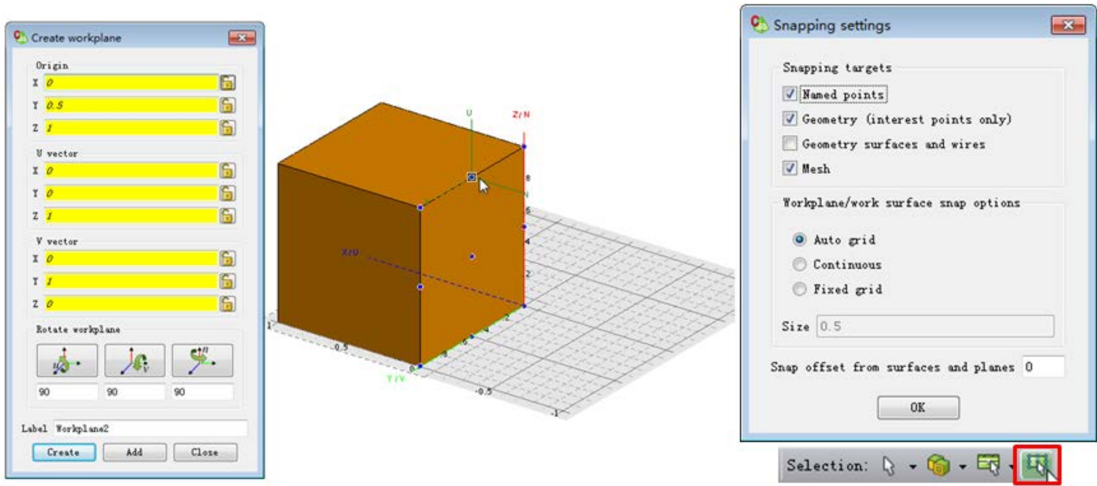


图 3-48　采用 Snapping 方式定义 Workplane

3.5.3 基于Workplane建模

在本操作练习中，我们要采用 Workplane 的方法来建立如图 3-49 所示的模型。

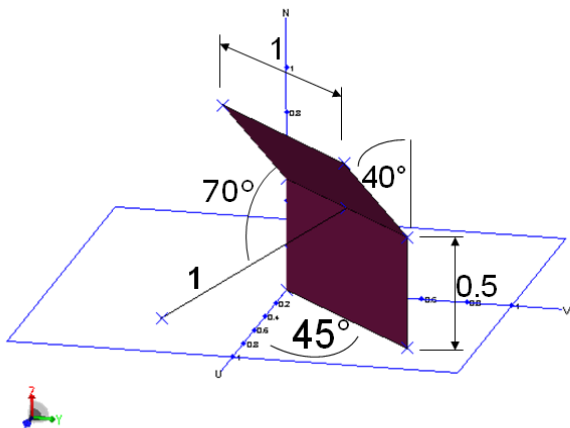


图 3-49　模型描述

1）启动 CADFEKO，新建一个工程并将其命名为“workplane_basic.cfx”。
2）创建 Plate_global。
单击“Construct” 菜单中的“Polygon”按钮，如图 3-50 所示。

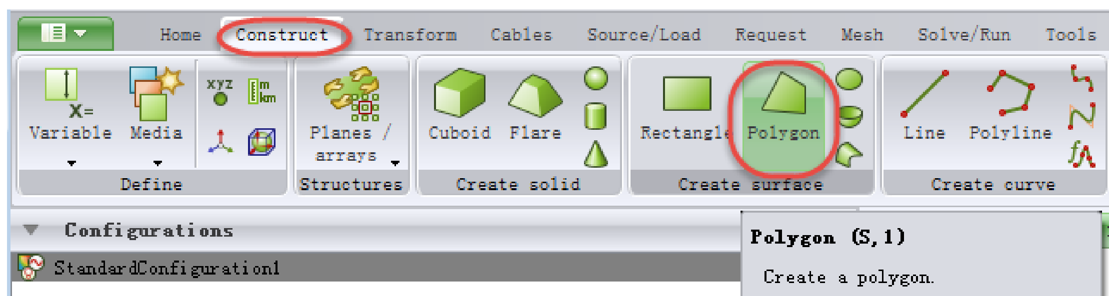


图 3-50　创建 Polygon

在弹出的“Create polygon”对话框（见图 3-51）中进行如下设置：
Corner 1 = (0, 0, 0)。
Corner 2 = (1/sqrt(2), 1/sqrt(2), 0)。
Corner 3 = (1/sqrt(2), 1/sqrt(2), 0.5)。
单击“Add”按钮。
Corner 4 = (0, 0, 0.5)。
在“Label”文本框中输入“Polygon_global”，最后单击“Create”按钮。
在 3D 视图中，调整模型如图 3-52 所示。

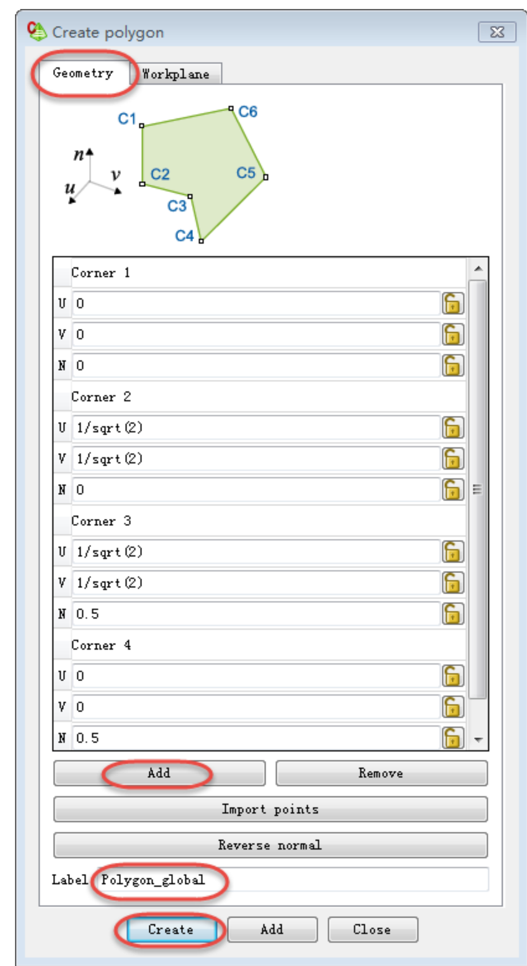


图 3-51　创建 Polygon_global

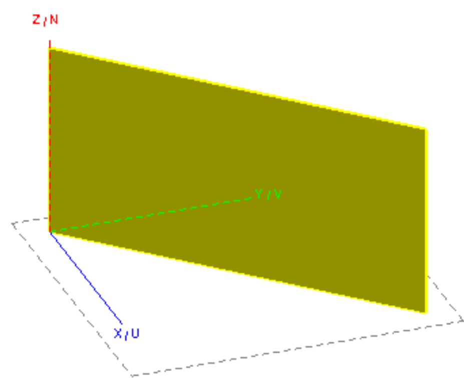


图 3-52　调整模型的角度和位置

3）创建 Plate_workplane。

单击“Construct”菜单中的“Polygon”按钮，如图 3-53 所示。

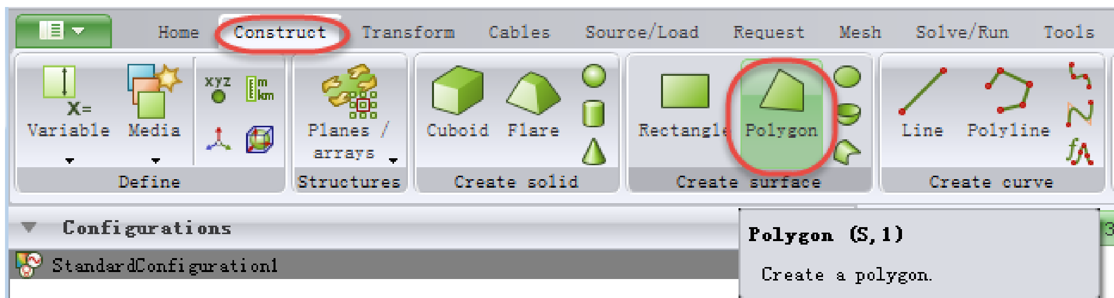


图 3-53　创建 Polygon

在弹出的“Create polygon”对话框（见图 3-54）中进行如下设置。

① 选择“Workplane”选项卡，把光标定在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉组合键，在 3D 视图中，移动光标到全局坐标的原点位置，确认新坐标系的 U 轴平行于模型 Polygon_global 的长边，如图 3-54 所示。



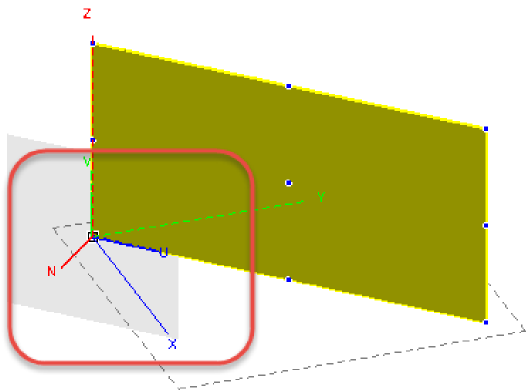


图 3-54　定义工作坐标系

② 返回“Geometry”标签，把光标定在“Corner1”区域，按住〈Ctrl+Shift〉组合键，在 3D 视图中从原点位置开始，按照逆时针方向依次单击模型 Polygon_global 的 4 个顶点，如图 3-55 所示。

③ 把 Label 命名为“Polygon_workplane”，然后单击“Create”按钮。

4）双击新建的模型“Polygon_workplane”，打开“Modify polygon”对话框进行如下设置：

选择“Workplane”选项卡，单击 U vector 和 V vector 矢量右侧的锁按钮，把光标定在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉组合键，在 3D 视图中用鼠标左键点选模型左上角的顶点。在绕 *u* 轴旋转的按钮下方设置 40，单击“ ”按钮一次，如图 3-56 所示，单击“OK”按钮。绕 *u* 轴旋转前后的模型对比如图 3-57 所示。

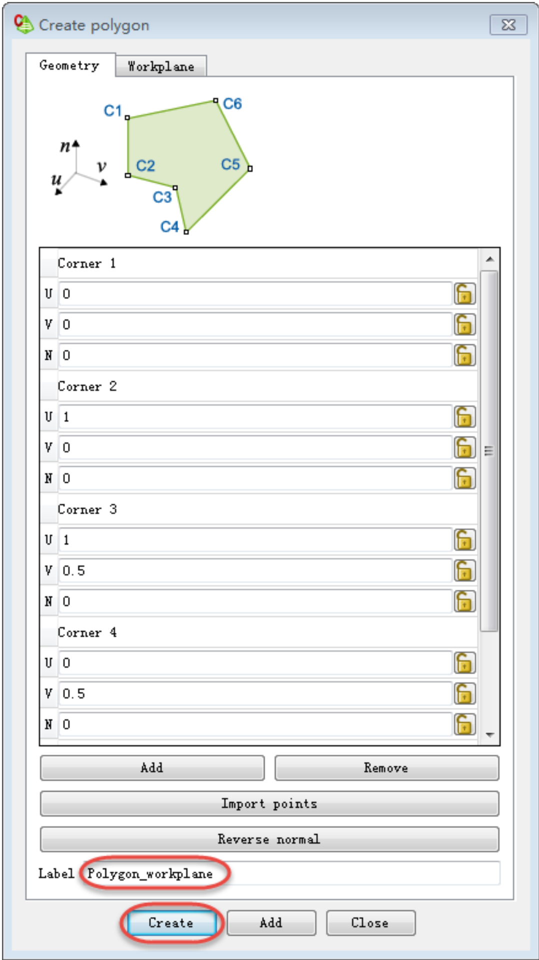


图 3-55　创建模型 Polygon_workplane

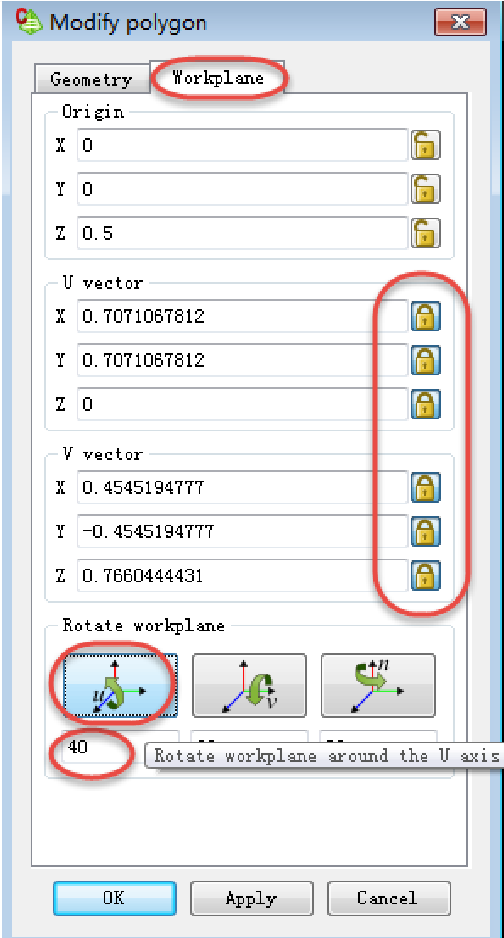


图 3-56　修改“Workplane”

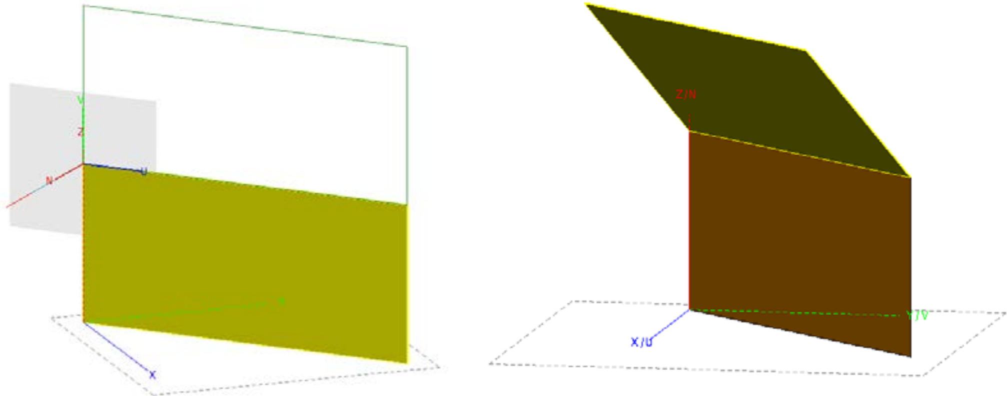


图 3-57　绕 *u* 轴旋转前后的模型对比

5）保存新建的工作平面“workplane_40deg”。双击新修正过的模型“Polygon_

workplane”，选择“Workplane”选项卡，在左侧的“模型与求解树形浏览器”中选中“Workplanes”结点，单击鼠标右键，选择“Add workplane”选项，弹出“Create workplane”对话框。可以看到在“Workplane”选项卡中的“Origin”“U vector”和“V vector”的值自动复制到新建的工作平面中，把 Label 更名为“Workplane_40deg”，单击“Create”按钮，如图 3-58 所示。

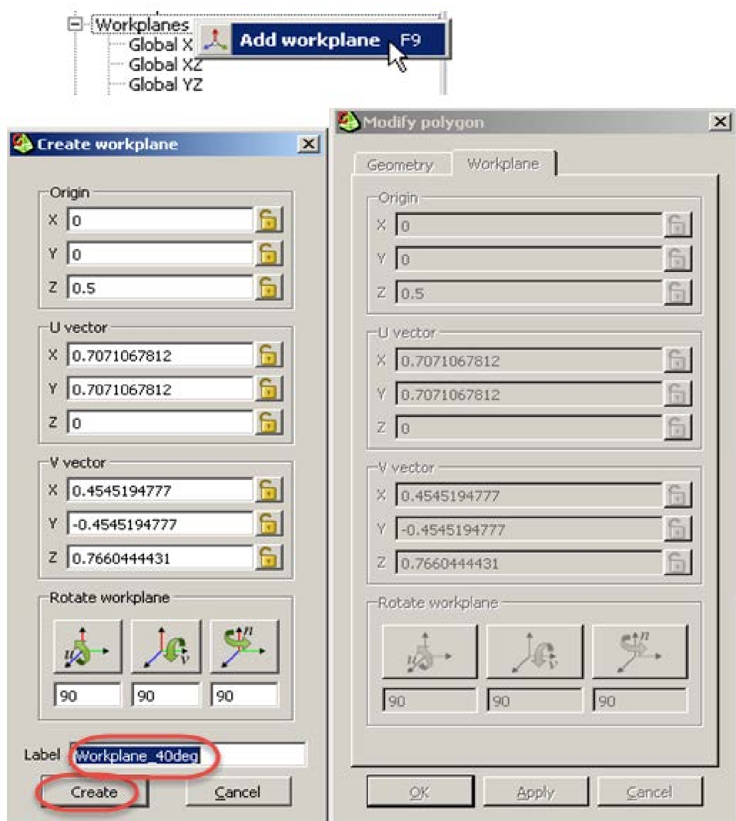


图 3-58　建立工作平面“Workplane_40deg”

在左侧的“模型与求解树形浏览器”中，展开“Workplanes”结点，选中“Workplane_40deg”，单击鼠标右键，选择“Set as default”选项，如图 3-59 所示。

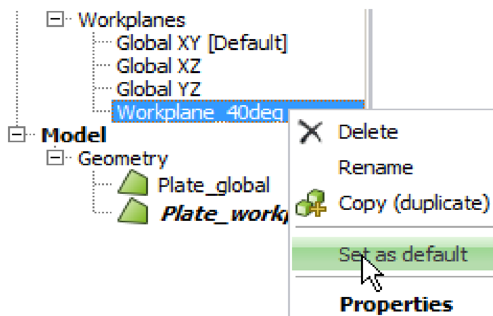


图 3-59　把“Workplane_40deg”设为默认工作坐标系

6）创建 Line

① 在“Construct”菜单中单击“Line”按钮，如图 3-60 所示。

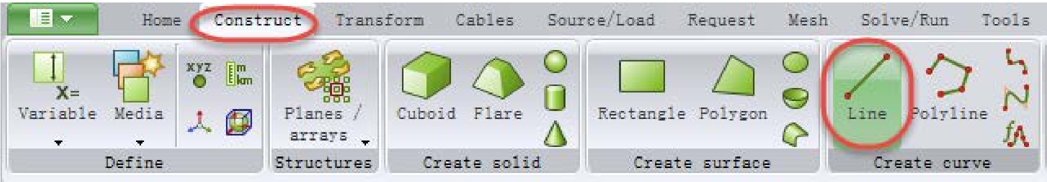


图 3-60　创建 Line 模型

② 在弹出的“Create Line”对话框中，选择“Geometry”选项卡，进行如下设置，如图 3-61 所示。

Start point: (U:0.5, V: 0.0, N: 0.0)。

End point：(U: 0.5, V: 0.0, N: 1)。

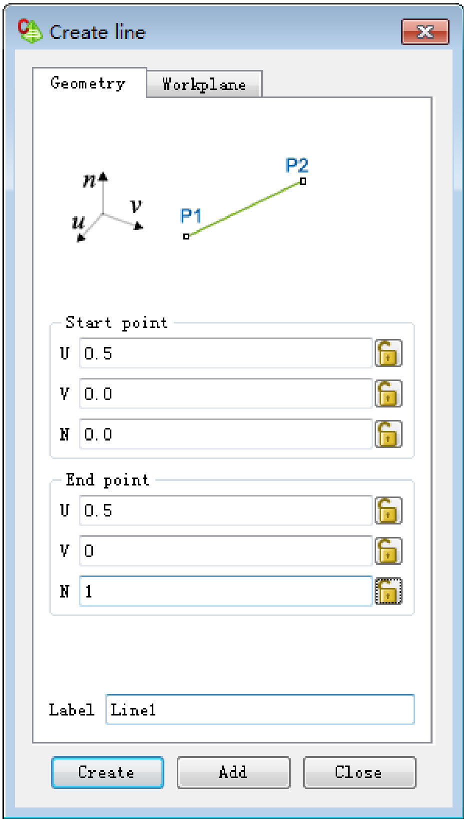
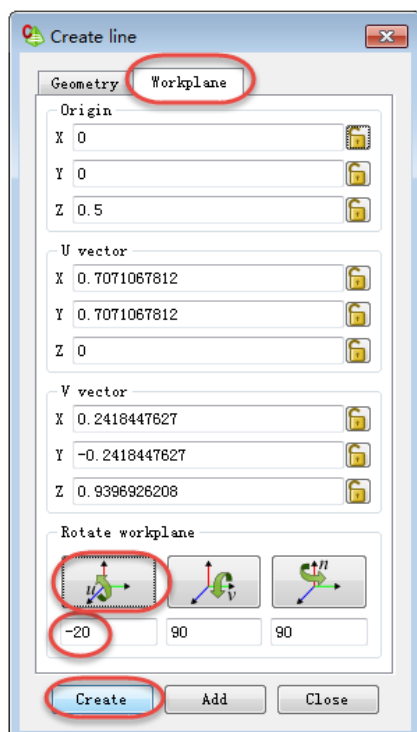


图 3-61　创建 Geometry

③ 切换到“Workplane”选项卡，在“绕 *u* 轴旋转”按钮“”下方的区域中把 90 修正为“-20”，单击按钮“”一次。再单击“Create”按钮，如图 3-62 所示。



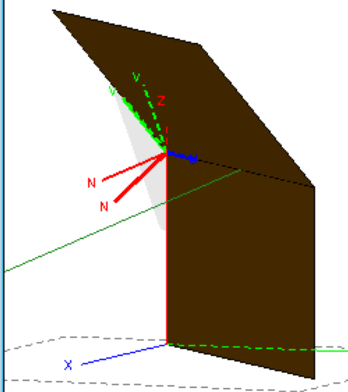


图 3-62　修正 Workplane

④ 在左侧的“模型与求解树形浏览器”中，展开“Geometry”结点，选中所有的模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把模型“Polygon_global”“Polygon_workplane”“Line1”合并成一个模型“Union1”，把该模型更名为“Bent”。

7）在“Mesh”菜单中单击“Create mesh”按钮“”，如图 3-63 所示，弹出“Create mesh”对话框（见图 3-64），进行如下设置。

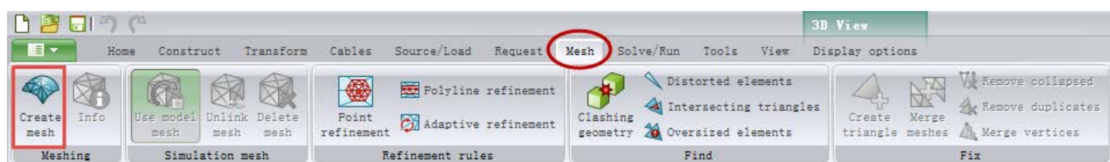


图 3-63　创建网格

① 在“Options”选项卡中设置如下。

Mesh size：Custom。

Triangle edge length: 0.1。

Wire segment length：0.1。

Wire segment radius: 0.001。

② 单击“Mesh”按钮，生成网格后，在“Display options”菜单中单击“Simulation mesh”按钮“”，如图 3-65 所示，进入只显示网格模式。剖分后的网格如图 3-66 所示。

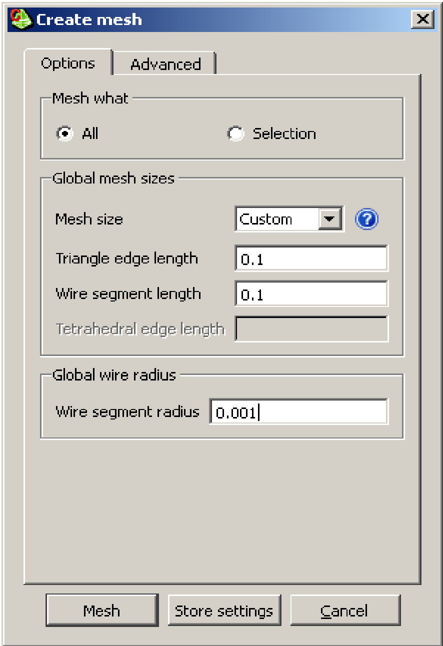


图 3-64　设定网格划分

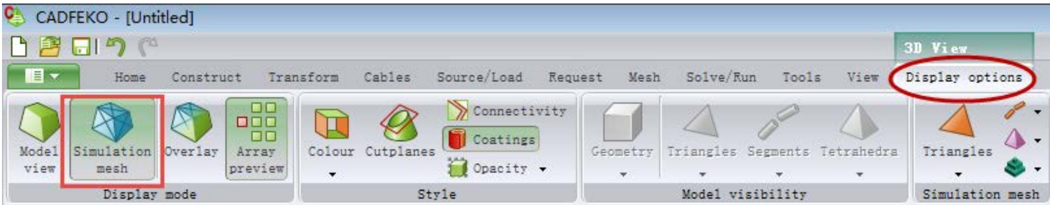


图 3-65　显示网格模式

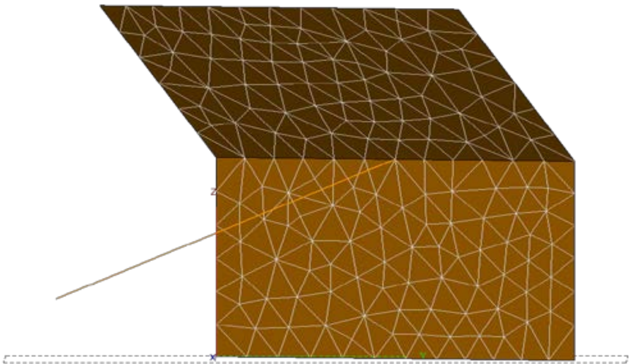


图 3-66　剖分后的网格

8）保存该工程文件。

本练习主要介绍了 FEKO 中 Workplane 的使用方法，并通过一个简单模型来练习 Workplane 的使用。在以后的软件使用中，读者可以根据模型的特点，灵活地运用这一功能。

3.6 建立FEKO工程的仿真过程

3.6.1 主要功能与仿真流程

FEKO 广泛应用于雷达目标体隐身、天线辐射、天线罩透波、载体天线布局、系统EMC、复杂线缆束 EMC 等，典型的应用框图和主要工作如图 3-67 所示，可以看出：

1）复杂的几何模型可以在 Altair-HyperMesh 中进行几何清理和网格生成并导入CADFEKO。

2）要进行天线布局仿真，常用天线可以直接读入或在 CADFEKO 中参数化建模。

3）匹配电路的快速生成可以选择 Optenni Lab，生成的匹配电路（.SNP）可以直接连接到天线端口，进行天线的辐射特性分析（考虑天线端口的匹配）。

4）复杂线缆模型可以直接读入标准格式文件.KBL。

5）FEKO 仿真得到的天线指标可以导入到 Altair-WinProp 进行复杂地形环境中的电波传播。

6）FEKO 仿真得到的天线隔离度可以导入 Altair-VisSim 进行数据通信链路的仿真评估。

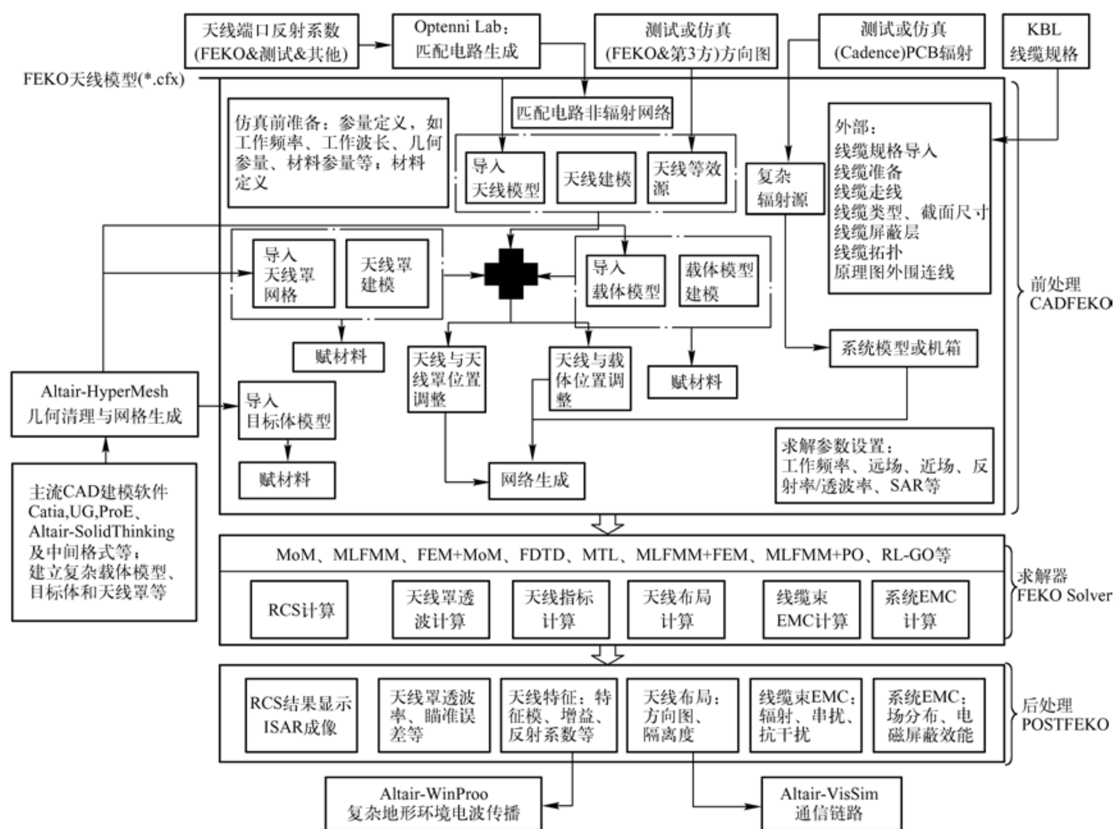


图 3-67　FEKO 典型问题仿真流程框图

3.6.2 建立FEKO工程的一般过程

建立 FEKO 工程的一般过程概述如下。

1）打开前处理模块 CADFEKO，新建一个工程（.cfx）。

2）定义长度单位，默认为 m（米）。

3）定义参量：工作频率 freq、工作波长 lam、材料参数（相对介电常数 eprs 和介质损耗正切 tand）、几何参量等。

4）定义材料：介质材料、磁性材料、分层介质等。

5）创建几何模型：参数化建模、布尔操作或外部导入几何模型。

6）为几何模型赋材料属性：体模型的 Region、面的材料。

7）对于天线仿真，定义端口：根据天线类型选择端口形式，如果考虑匹配网络，则定义非辐射网络，完成与天线端口的连接。

8）如果进行线缆束仿真，建立线缆走线、选择线缆类型、设置线缆规格、线缆屏蔽层等。

9）定义激励源：天线激励、功率或入射平面波、等效源等。

10）设置计算方法：默认是矩量法，可以设置多层快速多极子、高频方法等。

11）设置求解参数：远场、近场、电流、SAR、反射率/透波率、S 参数等。

12）如果要进行优化分析，则设置优化算法、扫描参数、优化目标等。

13）网格剖分：设置网格剖分规则，生成网格。

14）进行 CEM 检查。

15）预处理（PREFEKO)，生成.fek 文件。

16）进行并行计算设置，提交 FEKO 计算（Alt+4）。如果要进行优化，则提交优化计算（Alt+6）。

17）计算完成后，进入后处理模块 POSTFEKO。

18）显示计算结果：3D 云图、2D 曲线等，保存并生成计算报告。

第 4 章



FEKO软件的使用技巧与方法选择

4.1　天线的端口与激励
4.2　网格剖分技术
4.3　FEKO 的方法选择技巧
4.4　主要的求解参数设置
4.5　LUA 脚本基础与应用

4.1 天线的端口与激励

天线的种类很多，形式多种多样，对于每一种类型的天线，均有非常相似的仿真流程，在参考完本章内容的介绍之后，读者可以根据自己所关心的天线形式，选择性地阅读第 5 章的内容（详细介绍了各种类型天线在 FEKO 中的实现方法），并通过亲自操作，相信能熟练掌握任意形式天线在 FEKO 中的仿真实现。

对于天线的仿真，选择端口的类型和激励方式很关键，拿到一个天线模型之后，最大的问题就是该用什么端口呢？FEKO 中提供了丰富的端口形式和激励方式，总结见表 4-1，任何一种天线都可以按照表中的分类找到对应的端口形式和激励方式。

表 4-1　常用端口类型与激励

图示	端口类型	激励形式	天线类型
线模型	Wire Port	Voltage Source	Wire 天线 针馈波导天线
面模型	Edge Port	Voltage Source	微带天线 圆柱型振子天线
	Waveguide Port	Waveguide Excitation	矩形波导 圆波导 同轴线
采用 FEM 方法的介质体	FEM Line Port	Current Source	双基喇叭、多基喇叭、微带天线等
	FEM modal Port	FEM Modal Excitation	

4.1.1 线端口与电压源激励

顾名思义，这种端口形式主要针对的是线天线，而天线的部分建模采用的是线模型，这种端口形式对应的肯定是电压源激励，如图 4-1 所示。线端口可以定义在线单元上或节点上，默认是线单元上。其他的载体部分、地板部分等，均采用面单元。

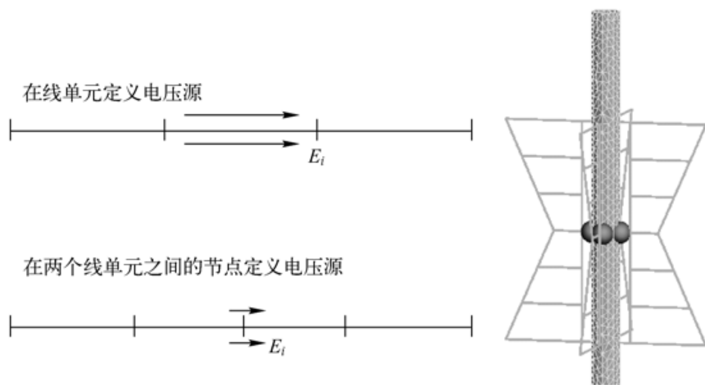


图 4-1　线端口设置与电压源激励

4.1.2 棱边端口与电压源激励

棱边端口（Edge Port）应用非常广泛，可应用于微带天线、同轴线等。棱边端口是在棱边上添加的，要求与该棱边连接的两个前向区域和后向区域的材料要相同，如果前向和后向区域的材料不同，那么就不能应用棱边端口，而是采用有限元模式端口，棱边端口对应的肯定是电压源激励，如图 4-2 所示。

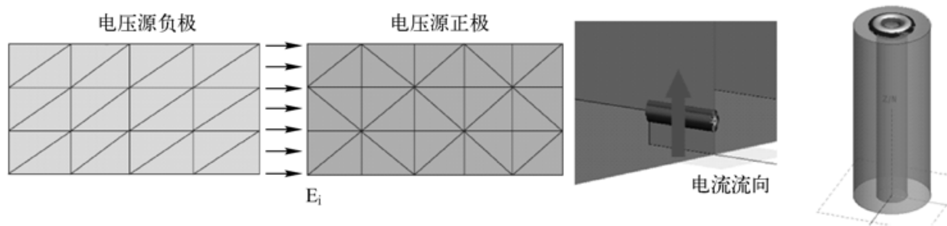


图 4-2　棱边端口设置与电压源激励

4.1.3 波导端口与波导激励

对于矩形波导、圆波导和同轴线，可以采用波导端口“Waveguide Port”（对于较低版本，要求该面的前向和后向材料要一致），对应的激励源是波导激励（Waveguide Source），如图 4-3 所示，波导端口面元的剖分建议采用小于或等于 lam/13。端口的箭头指向代表电磁波能量的传播方向，所以箭头一定要指向波导的内部。如果内部填充了介质，则该面元的材料属性必须是介质面，如果内部是 Freespace，则该面元的材料是 PEC。该面元只是表示电磁能量是从该面注入的。

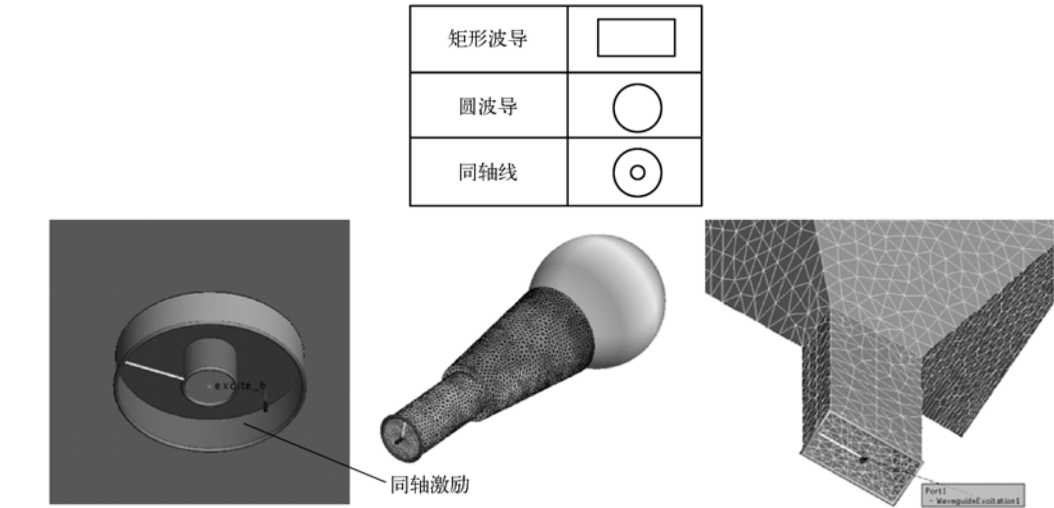


图 4-3 波导端口设置与波导激励

4.1.4 有限元模式端口与激励

当波导的截面是非规则形状（如工型结构）时，无法添加波导端口，这时就可以采用有限元模式端口（FEM Modal Port）和有限元模式激励（FEM Modal Excitation），也可以采用有限元线端口（FEM Line Port）和电流源激励（Current Source），如图 4-4 所示。注意，要使用这两种端口形式，必须把这些介质区域设置为 FEM 方法，如果波导腔体没有填充介质，这时可以设定一种 Air 新材料，并把波导腔体设置为 Air 材料，在模型的 Region 区域，把其求解方法设置为 FEM。

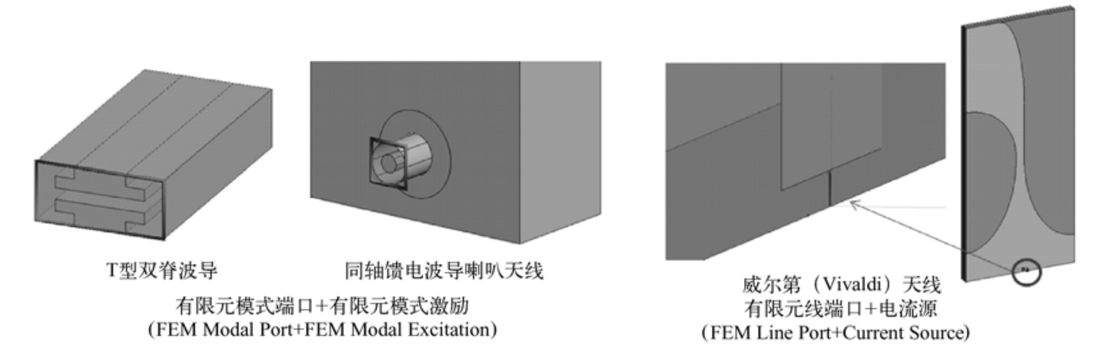


图 4-4 有限元端口与激励

4.1.5 微带线端口与激励

对于微带线或带状线，可以采用微带线端口形式，这种端口只能采用平面分层格林函数法，建模时只需要建立贴片部分。可以参考 FEKO 自带的例子“../feko\examples\ExampleGuide_

models\Example-A09-Circular_Microstrip_Patch_with_Coupled_Feed/Patch_Coupled.cfx”。该端口形式对应电压源激励，如图 4-5 所示。

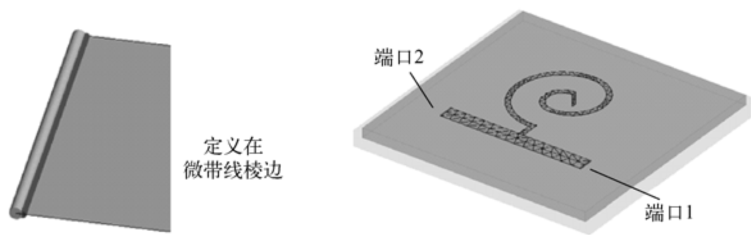


图 4-5　微带端口与电压源激励

4.1.6　远、近场等效技术

对于关心天线布局的系统工程师和天线罩透波的设计师，往往很难得到天线详细的几何数据模型，从天线设计师得到天线的仿真结果数据（方向图或包络场）或利用天线的测试数据是一种可行的方法。即使可以得到天线详细几何数据模型，要进行天线布局或天线罩透波特性的分析，采用等效源来代替复杂的天线模型会大大降低计算的复杂度，是一种很好的解决该类工程问题的方法。这种方法也适用于反射面天线的仿真。

FEKO 同时支持口面近场等效和远场等效方法，应用起来也非常简单实用。可以利用 FEKO 软件仿真天线，同时得到天线远场方向图数据文件（*.ffe）或天线的包络场文件（*.efe 和*.hfe）。

1．口面近场等效

基于惠更斯等效原理（见图 4-6），用天线的包络场能够精确等效天线的辐射，如图 4-7 所示。

The aperture is based on the equivalence principle. This states that the sources and scatterers inside a given volume can be removed, and modelled by placing the equivalent currents $\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H}$ and $\vec{M}_s = -\hat{n} \times \vec{E}$ on the enclosing surface. The vector $\hat{n}$ is a unit vector, normal to the surface, and points towards the exterior region. The fields in this region are the same as the original fields, while those in interior region are zero.

图 4-6　口面近场基本原理

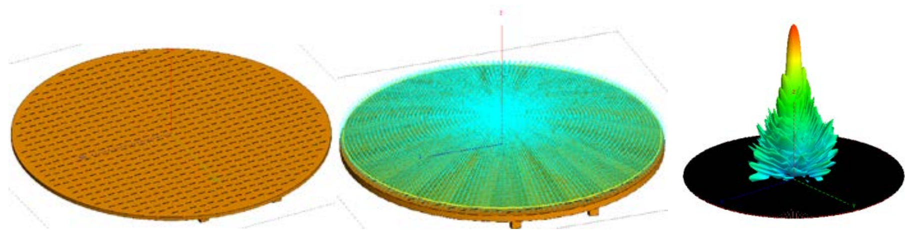


图 4-7　利用口面近场等效波导缝隙天线

在 CADFEKO 中要应用口面近场等效的设置方法如下：

在左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选择“Configuration”选项卡，展开

“Global”结点，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Near field”选项，弹出“Add near field source”对话框，单击“Field data”右侧的按钮“ ”，选择“Define near field data file structure”后，进入“Define near field data file structure”对话框，这里应用的数据可以是 FEKO 生成的.efe& .hfe 文件，也可以是 ASCII 文件形式，如图 4-8 所示。

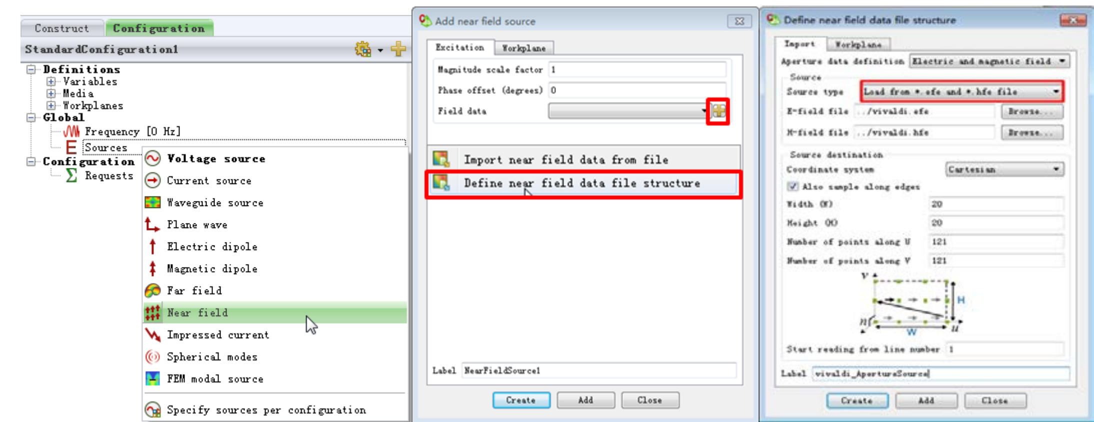


图 4-8　读取口面近场数据作为等效源

在图 4-8 中间图片所示，如果选择“Import near field data from file”，则可以读入其他仿真软件（如 Cadence 的 PCB 分析模块 sigirity 的*.nfd 格式文件）或测试数据（来自于 Orbit satimo Measurement file-*.mfxml）。

参考本章 4.4.1 节关于近场设置部分，在进行近场设置计算时，在“Request near fields”对话框中选择“Advanced”选项卡，勾选“Export fields to ASCII file(*.efe,*.hfe)”复选框，如图 4-9 所示。在计算完成后，会直接生成*.efe 和 *.hfe 文件，以直角坐标系为例（见图 4-10），该文件中的主要参数包括：

电场文件*.efe: X　Y　Z　Re(Ex)　Im(Ex)　Re(Ey)　Im(Ey)　Re(Ez)　Im(Ez)

磁场文件*.hfe: X　Y　Z　Re(Hx)　Im(Hx)　Re(Hy)　Im(Hy)　Re(Hz)　Im(Hz)

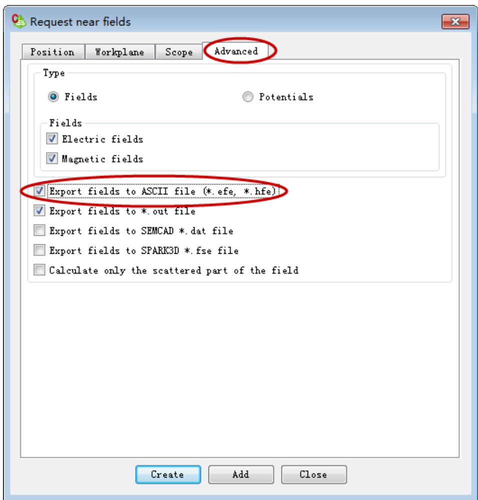
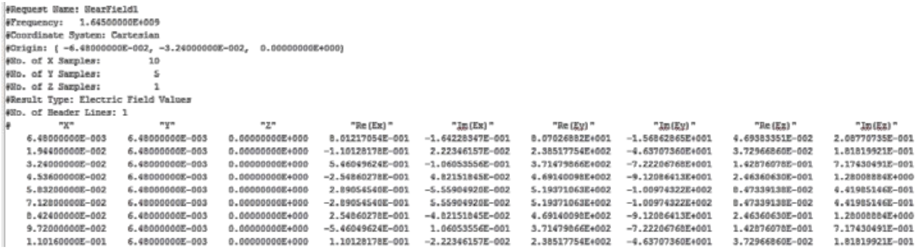


图 4-9　生成口面近场数据文件



```
#Request Name: NearField1
#Frequency:   1.64500000E+009
#Coordinate System: Cartesian
#Origin: ( -6.48000000E-002, -3.24000000E-002,  0.00000000E+000)
#No. of X Samples:        10
#No. of Y Samples:         5
#No. of Z Samples:         1
#Result Type: Electric Field Values
#No. of Header Lines: 1
#          "X"              "Y"              "Z"             "Re(Ex)"          "Im(Ex)"          "Re(Ey)"          "Im(Ey)"          "Re(Ez)"          "Im(Ez)"
   6.48000000E-003  6.48000000E-003  0.00000000E+000   8.01217054E-001  -1.64228347E-001   8.07026882E+001  -1.56862865E+001   4.69383351E-002   2.08770735E-001
   1.94400000E-002  6.48000000E-003  0.00000000E+000  -1.10128178E-001   2.22346157E-002   2.38517754E+002  -4.63707360E+001   3.72966860E-002   1.81819921E-001
   3.24000000E-002  6.48000000E-003  0.00000000E+000   5.46049624E-001  -1.06053556E-001   3.71479866E+002  -7.22206768E+001   1.42876078E-001   7.17430491E-001
   4.53600000E-002  6.48000000E-003  0.00000000E+000  -2.54860278E-001   4.82151845E-002   4.69140098E+002  -9.12086413E+001   2.46360630E-001   1.28008884E+000
   5.83200000E-002  6.48000000E-003  0.00000000E+000   2.89054540E-001  -5.55904920E-002   5.19371063E+002  -1.00974322E+002   8.47339138E-002   4.41985146E-001
   7.12800000E-002  6.48000000E-003  0.00000000E+000  -2.89054540E-001   5.55904920E-002   5.19371063E+002  -1.00974322E+002   8.47339138E-002   4.41985146E-001
   8.42400000E-002  6.48000000E-003  0.00000000E+000   2.54860278E-001  -4.82151845E-002   4.69140098E+002  -9.12086413E+001   2.46360630E-001   1.28008884E+000
   9.72000000E-002  6.48000000E-003  0.00000000E+000  -5.46049624E-001   1.06053556E-001   3.71479866E+002  -7.22206768E+001   1.42876078E-001   7.17430491E-001
   1.10160000E-001  6.48000000E-003  0.00000000E+000   1.10128178E-001  -2.22346157E-002   2.38517754E+002  -4.63707360E+001   3.72966860E-002   1.81819921E-001
```

图 4-10　生成的口面近场数据文件格式

如果是其他软件生成的近场数据，如图 4-11 所示，也可以按照如下格式来存成文本文件：

电场文件*.dat/.txt: X Y Z Mag(Ex)　Phase(Ex)　Mag(Ey) Phase(Ey)　Mag(Ez) Phase(Ez)

磁场文件*.dat/.txt: X Y Z Mag(Hx)　Phase(Hx)　Mag(Hy)　Phase(Hy)　Mag(Hz)　Phase(Hz)

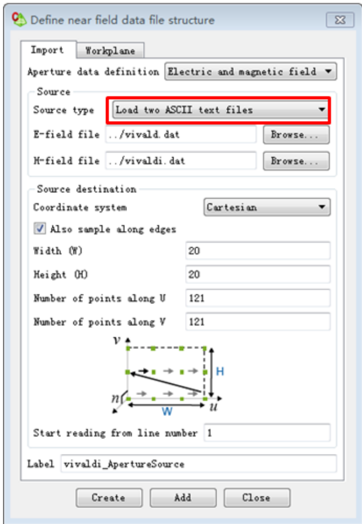


图 4-11　读入其他软件生成的口面近场数据（文本格式.dat 或.txt）

对于阵列天线，也可以利用单元天线的口面场，生成多个口面近场的阵列，调整每一个口面场的放置位置，并可对每一个口面近场的幅度和相位进行加权。

口面近场的等效方法适用于天线等效、复杂电路板（读入 Cadence 的仿真数据或来自于测试数据）的等效等。

口面近场也可以作为理想接收源，通过计算直接得到接收功率，等效接收天线或电路板的接收。

2. 远场等效法

远场等效的方法多应用于天线布局的发射天线等效和反射面天线的馈源天线等效。

在 CADFEKO 中应用远场点源等效的设置方法如下：

在左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选择“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Far field”选项，弹出“Add far field point source”对话框，单击“Field data”右侧的按钮“”，选择“Define far field data”选项后，进入“Define far field data”对话框，这里应用的数据可以是 FEKO 生成的.ffe 文件，也可以是 ASCII 文件形式，如图 4-12 所示。

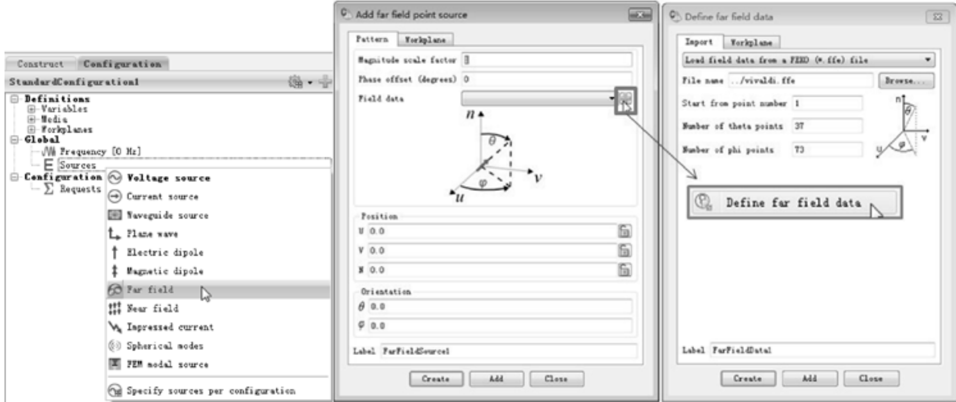


图 4-12　读取远场数据作为点等效源

参考本章 4.4.2 节中关于远场设置的部分，在进行远场设置计算时，在“Request far fields”对话框中选择“Advanced”复选框，勾选“Export fields to ASCII file(*.ffe)”或“Export spherical expansion coefficients to ASCII file”复选框，如图 4-13 所示。在计算完成后，会直接生成*.ffe 或*.sph 文件，如图 4-14 所示。在*.ffe 文件中的主要参数包括：

远场文件*.ffe: Theta Phi Re(Etheta) Im(Etheta) Re(Ephi) Im(Ephi) Directivity(theta) Directivity(phi) Directivity(Total)

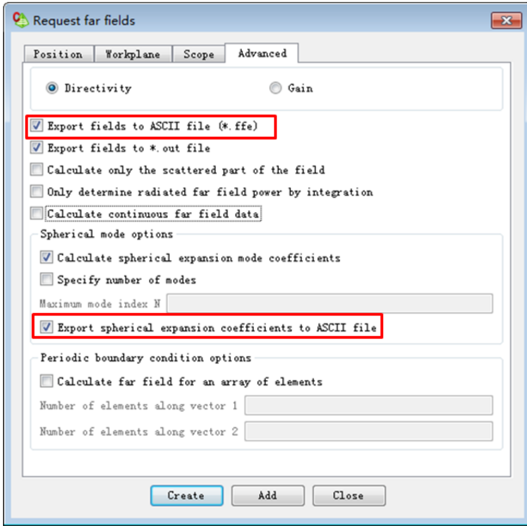


图 4-13　生成远场数据文件（*.ffe）或球面模式场文件（*.sph）

```
#Request Name: ff3d
#Frequency:   1.64500000E+009
#Coordinate System: Spherical
#No. of Theta Samples: 37
#No. of Phi Samples: 73
#Result Type: Directivity
#No. of Header Lines: 1
#         "Theta"            "Phi"          "Re(Etheta)"      "Im(Etheta)"       "Re(Ephi)"        "Im(Ephi)"     "Directivity(Theta)" "Directivity(Phi)" "Directivity(Total)"
     0.00000000E+000   0.00000000E+000   4.27046365E-002  -2.90826703E-002   3.01694077E+001  -3.24938488E+001  -4.40338205E+001   1.46378312E+001   1.46378371E+001
     5.00000000E+000   0.00000000E+000   2.40465095E-001   8.79314033E-001   2.74768346E+001  -3.16932416E+001  -1.91020026E+001   1.41556400E+001   1.41576907E+001
     1.00000000E+001   0.00000000E+000   5.30529757E-001   1.29305918E+000   2.05825481E+001  -2.89789511E+001  -1.53900459E+001   1.27173808E+001   1.27240906E+001
     1.50000000E+001   0.00000000E+000   7.02589301E-001   1.01991016E+000   1.25058301E+001  -2.41451811E+001  -1.64402751E+001   1.03906099E+001   1.03996100E+001
     2.00000000E+001   0.00000000E+000   3.96016831E-001   4.29594881E-001   6.19856457E+000  -1.82708924E+001  -2.29657051E+001   7.41022066E+000   7.41420167E+000
     2.50000000E+001   0.00000000E+000  -2.91934298E-001   2.48066845E-001   2.47244884E+000  -1.33173754E+001  -2.66319400E+001   4.33744418E+000   4.34091692E+000
     3.00000000E+001   0.00000000E+000  -6.29506272E-001   7.28686996E-001  -6.26475228E-002  -1.00580056E+001  -1.86260709E+001   1.75230627E+000   1.79193077E+000
```

图 4-14　生成的远场数据文件格式（*.ffe）

如果是其他软件生成的近场数据，如图 4−15 所示，也可以按照如下格式来存成文本文件：

远场文件*.dat/.txt: Theta Phi Mag(Etheta) Phase(Etheta) Mag(Ephi) Phase(Ephi)

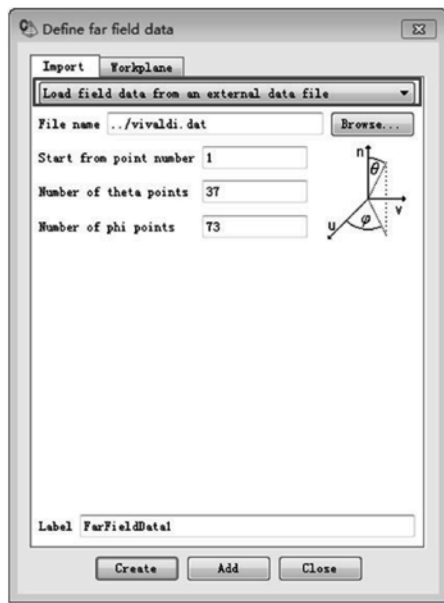


图 4−15 读入其他软件生成的远场数据（文本格式.dat 或.txt）

对于阵列天线，也可以利用单元天线的远场数据（如*.ffe），通过生成多个远场点源来调整每一个点源的放置位置，并可对每一个远场点源的幅度和相位进行加权。可以利用 LUA 脚本来快速生成这些阵列，或在 EDITFEKO 中通过循环直接生成，如图 4−16 所示。

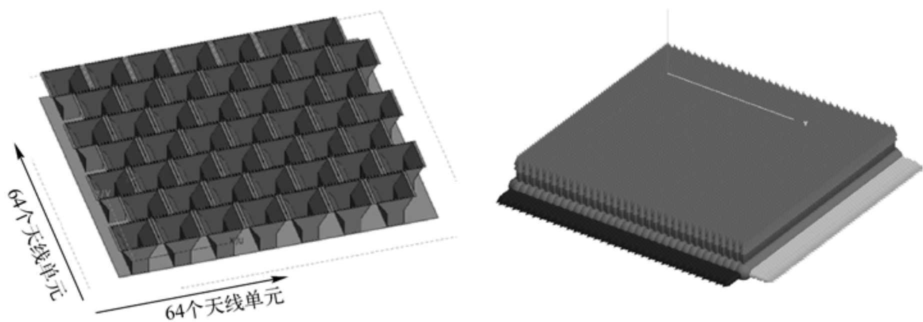


图 4−16 64×64 波导喇叭天线阵列（左）和 64×64 个远场方向图组成的阵列（右）

远场点源等效也可以作为理想接收源，通过计算直接得到接收功率，等效于接收天线。第 5 章中关于反射面天线的仿真应用详细介绍了各种等效源的使用方法。

4.2 网格剖分技术

CADFEKO 中内置网格剖分器，可以剖分线网格、三角形面网格、四面体和六面体网格、高阶三角形网格等，与求解器相关。网络类型与对应求解器说明见表 4−2。

表 4-2　网格类型与对应求解器说明

网格类型	求解器	剖分尺寸
线网格	矩量法（MoM）	线单元长度 L 要大于 lam/10；线单元剖分半径 r 与线单元长度 L 的关系要满足 $L/r>3$
三角形网格	矩量法（MoM） 多层快速多极子法（MLFMM） 物理光学（PO）	网格尺寸必须小于波长/3
	大面元物理光学法（LEPO） 射线几何光学法（RL-GO）	网格尺寸可以根据模型情况灵活设置剖分规则
高阶曲面三角形	高阶矩量法（HOBF+MoM） 高阶多层快速多极子（HOBF-MLFMM）	与所选的阶数有关，剖分规则可以在 lam～lam/10 之间取值
	射线几何光学法（RL-GO）	保证几何外形即可
四面体网格	有限元法（FEM） 矩量法（MoM） 多层快速多极子法（MLFMM）	一般在 0.1～0.3 个介质波长之间取值
六面体网格	时域有限差分法（FDTD）	Fine 模式采用 1/28 个波长，Standard 模式采用 1/20 个波长，Coarse 模式采用 1/14 个波长

要设置全局网格剖分尺寸，单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，或直接按〈Ctrl+M〉快捷键，弹出“Create mesh”对话框，进行网格剖分，这里选择用户自定义方式（即 Custom），如图 4-17 所示。

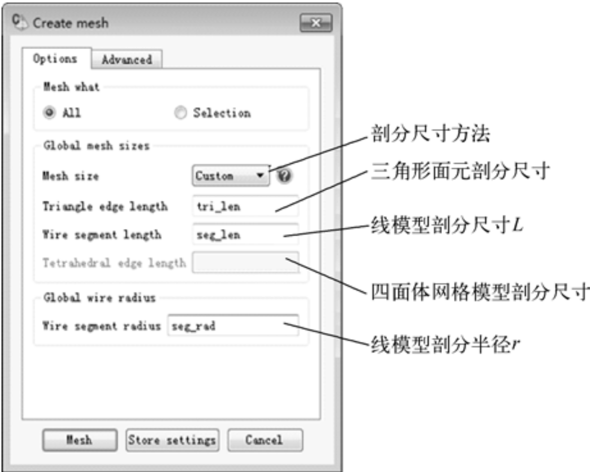


图 4-17　全局网格剖分

在图 4-17 中设置“Mesh size”时，还可以选择“Coarse”“Standard”和“Fine”选项，选择这 3 种方式必须先设置好工作频率，软件在进行网格剖分时，会根据工作频率、材料属性和模型情况来生成网格。全局网格剖分规则建议值如图 4-18 所示。

Table 3-8: Automatic meshing for wires.

Type	*Fine*	*Standard*	*Coarse*
Method of moments (MoM)	$^1/_{25}\lambda$	$^1/_{12}\lambda$	$^1/_8\lambda$

Table 3-9: Automatic meshing for faces and edges.

Type	*Fine*	*Standard*	*Coarse*
MoM (RWG or 0.5 order basis function)	$^1/_{16}\lambda$	$^1/_{12}\lambda$	$^1/_8\lambda$
MoM (1.5 order basis function)	$^3/_{16}\lambda$	$^1/_4\lambda$	$^3/_8\lambda$
MoM (2.5 order basis function)	$^1/_{3.2}\lambda$	$^1/_{2.4}\lambda$	$^1/_{1.6}\lambda$
MoM (3.5 order basis function)	$^1/_{1.6}\lambda$	$^1/_{1.2}\lambda$	$^1/_{0.8}\lambda$
Physical optics (PO)	$^1/_{10}\lambda$	$^1/_8\lambda$	$^1/_6\lambda$
Large element PO (LE-PO)	$^9/_5\lambda$	$^9/_5\lambda$	$^9/_5\lambda$
Geometrical optics (RL-GO)	∞	∞	∞

Table 3-10: Automatic meshing for regions.

Type	*Fine*	*Standard*	*Coarse*
Finite element method (1 st order FEM)	$^1/_{15}\lambda$	$^1/_{10}\lambda$	$^1/_6\lambda$
Finite element method (2 nd order FEM)	$^1/_{12}\lambda$	$^1/_8\lambda$	$^1/_6\lambda$
Volume equivalence principle (VEP)	$^1/_{16}\lambda$	$^1/_{12}\lambda$	$^1/_8\lambda$

图 4-18　全局网格剖分规则建议值

FEKO 也支持局部剖分规则定义，保证局部模型细节的网格和端口的电参数性能，可以支持局部网格的剖分规则（支持参数化）：

- 支持棱边（Edges）剖分规则，如图 4-19 所示。
- 支持面元（Faces）剖分规则，如图 4-20 所示。
- 支持体区域（Region）的剖分规则。

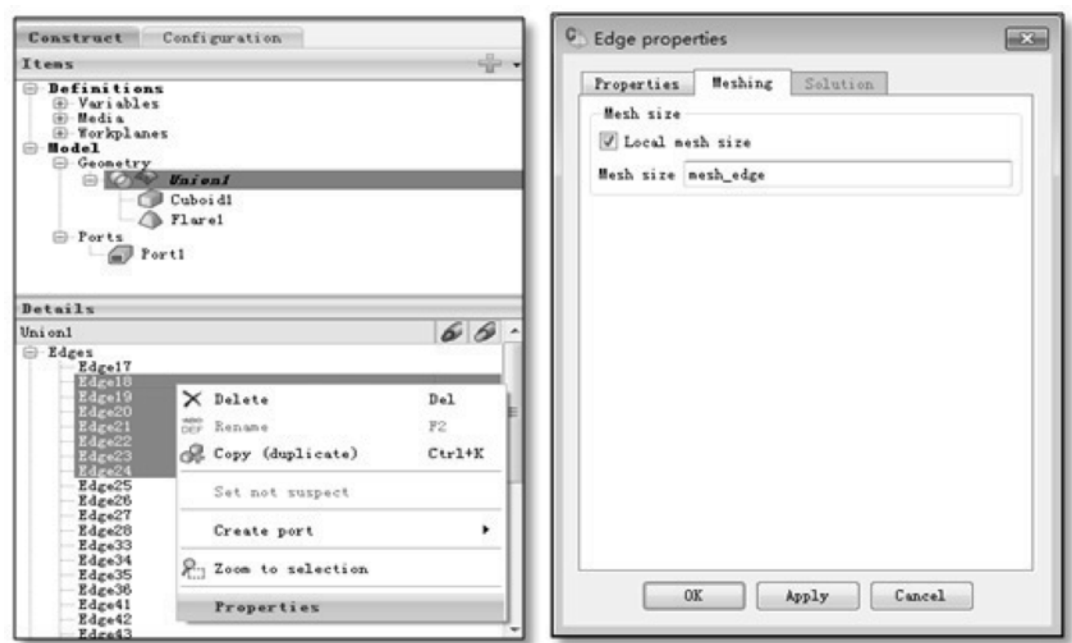


图 4-19　设置棱边剖分规则

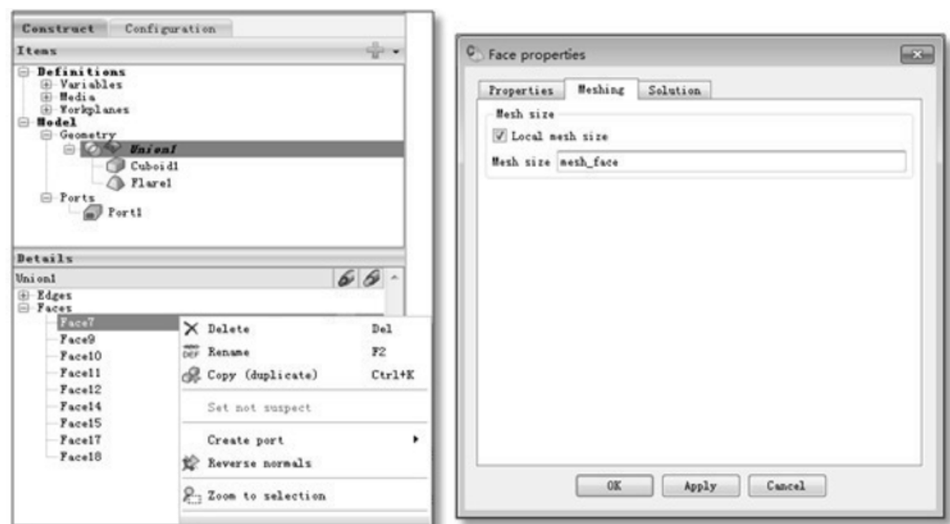


图 4-20　设置面元剖分规则

设置了局部剖分规则的棱边、面元或体，在剖分的时候会按照局部剖分规则来剖分，没有设置剖分规则的其他棱边、面元和体，就会选择在“Create Mesh”对话框中设置的全局剖分尺度来生成网格。

4.3 FEKO的方法选择技巧

FEKO 提供了丰富的求解器，如图 4-21 所示，包括矩量法（MoM）、多层快速多极子（MLFMM）、有限元（FEM）、时域有限差分（FDTD）、高阶方法（高阶矩量法、高阶多层快速多极子）、高频物理光学法（PO）、大面元物理光学法（LE-PO）、射线几何光学法（RL-GO）、一致性绕射法（UTD），以及矩量法与所有高频方法的混合、多层快速多极子与物理光学法的混合、多层快速多极子与大面元物理光学法的混合、多层快多极子与有限元的混合、多导体传输线（MTL）、矩量法与传输线法的混合（MoM+MTL）、多层快速多极子与传输线法的混合（MLFMM+MTL）、等效源法（参见 4.1.6 节）与所有算法的混合等。所有的求解技术均支持多 CPU 多核并行。对于 FDTD 求解器的求解和 MoM 方法的矩阵填充支持 GPU 加速。

绝大多数问题可以同时选择多种求解技术，即一个问题对应多个求解方案，相互之间进行验证。算法的基础部分，可以参见第 2 章的内容。

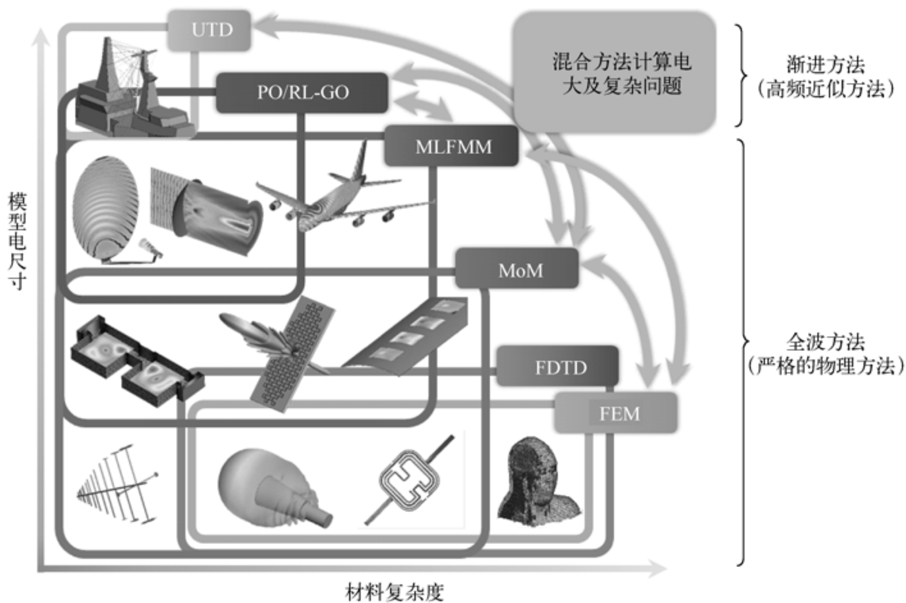


图 4-21　FEKO 中丰富的求解器

在一个模型中，可能会包含线模型、面模型、体模型，剖分之后对应线单元、三角形面元、四面体单元以及六面体单元，网格单元的类型和求解方法相互对应，具体见表 4-3。

表 4-3　网格单元与算法的对应

单元类型	计算方法	图示
线模型：线单元	MoM	
面模型：三角形面单元	MoM、MLFMM、高阶、高频方法（PO、LEPO、RL-GO、UTD）	
体模型：四面体单元（只能是介质体，面可以是金属面）	FEM、MoM、MLFMM	
体模型：六面体单元	FDTD	
线缆模型：cable	MTL	无网格
面模型：三角形面元 体模型：四面体单元	MoM+FEM MLFMM+FEM	

1. 矩量法（MoM）

在没有设置高频方法、有限元法、勾选多层快速多极子法、勾选时域有限差分法时，所有的面单元均采用矩量法，所有的线模型采用矩量法。

矩量法也支持体网格，应用相对较少，目前多采用三角形面网格。

矩量法对内存的要求较高，所需内存正比于N^2，计算时间正比于N^3，其中N是计算未知量，所以 7 万未知量的规模问题，内存在 80GB左右；可以根据运算机器内存的大小，考虑是否选择该方法；该方法在计算单站RCS的优势是：计算完成第一个角度之后，会得到阻抗逆矩阵，其他的雷达入射角度下的散射场会很快得到。

2. 多层快速多极子（MLFMM）

绝大多数（几个波长以上）的工程问题，包括辐射、散射，包含金属、介质的问题，均可以选择多层快速多极子方法，其内存需求正比于 $N\times\log(N)$，计算时间正比于 $N\times\log N\times$

log*N*，是应用最多的求解技术之一。

在没有设置有限元法、勾选时域有限差分方法、没有设置高频方法时，单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，如图 4–22 所示，弹出“Solver settings”对话框，选择“MLFMM/ACA”选项卡，选中“Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)”单选按钮，如图 4–23 所示。



图 4–22　设置 MLFMM 求解器 1

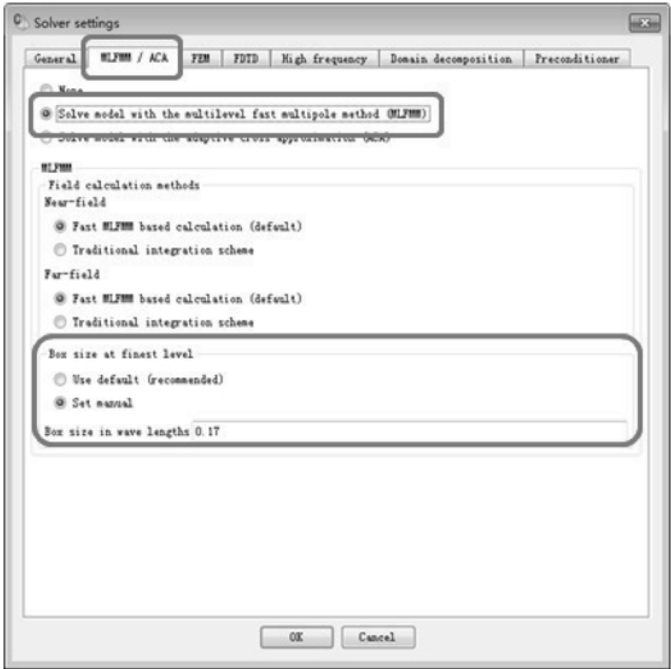


图 4–23　设置 MLFMM 求解器 2

在选择了多层快速多极子方法时，可以选择预条件（Preconditioner），默认的预条件是 SuperLU(8193)，也可以选择 SPAI 预条件(8192)，也可以设置迭代步数（Maximum number of iterations）和迭代残差（Stopping criterion for residuum）等。

8193 预条件适合于未知量在 140 万以下的问题，收敛好，内存要求较 8192 多一些。

在“Solver settings”对话框，选择“Preconditioner”选项卡进行设置：

1）Maximum number of iterations：默认值为 500。

2）Stopping criterion for residuum：默认值为 0.003，也可以设置成 0.009。

3）Preconditioner：可以选择 SuperLU(8193)或 SPAI(8192)，如图 4–24 所示。

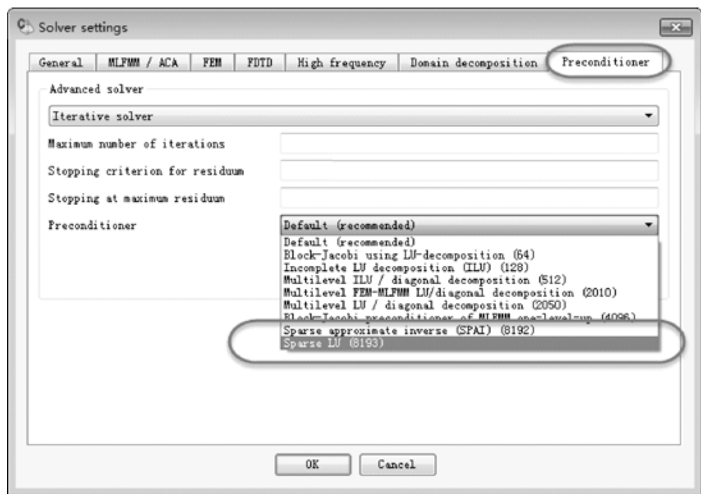


图 4-24　设置 MLFMM 的预条件

关于 EFIE & CFIE：当处理的问题是封闭的金属体（法向朝外）时，建议采用 CFIE 方程，收敛快，封闭模型建立时，默认法向朝外；对于包含金属与介质模型中的金属结构，可以设置为 CFIE，并且可以调整其系数（在 EDITFEKO 中完成）。调整其系数会改变收敛性。

CFIE 方法主要是针对多层快速多极子方法，为改进其收敛性所采用的技术。目前，多层快速多极子方法与物理光学法混合（MLFMM+PO/LEPO）不支持 CFIE。

CFIE 方法的设置（注意，设置的是面元）：在模型和求解树形浏览器中，选择模型，展开“Faces”结点，选中需要设置为 CFIE 的面元，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，在弹出的“Face properties”对话框中单击“Solution”选项卡，修改“Integral equation”为“Combined field”，如图 4-25 所示。

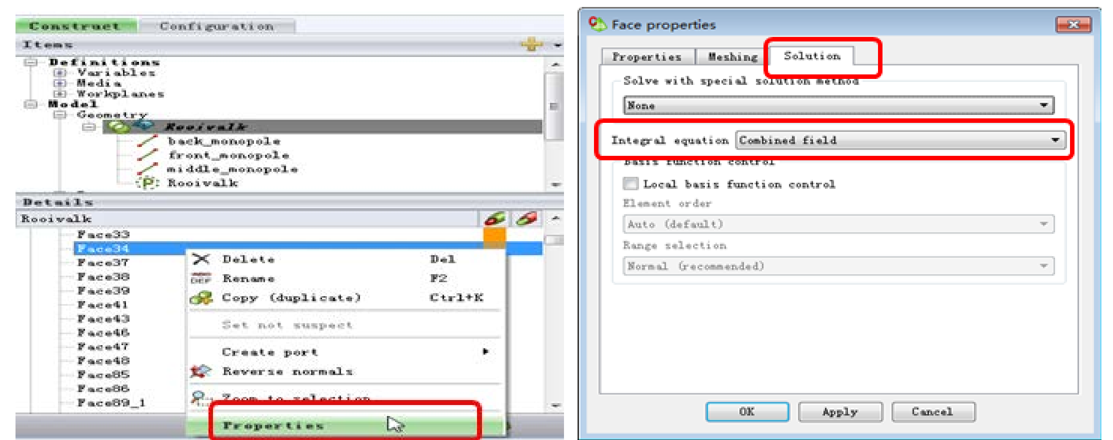


图 4-25　设置面元的求解属性为“Combined field”

建议的网格划分尺寸为：波长/3～波长/10，对于宽频带问题，建议分频段来计算，以提高效率。但当模型的细节太多时，会造成近场矩阵增加，计算内存会随着近场矩阵的增加而

增加，可以调整 Box Size 大小（在 0.16～0.25 之间取值），默认值是 0.23，当这个值减小时，会降低近场矩阵的大小，从而节约内存。在图 4-23 中，可以调整“Box size at finest level”，选中“Set manual”单选按钮，并设置“Box size in wave lengths”。

可参考光盘自带的工程“…/projects/chapter4/solver/MLFMM/*.cfx”了解各种快速多极子技术的使用与设置。

3. 高阶方法（高阶矩量法、高阶多层快速多极子）

在没有设置有限元、时域有限差分和高频方法的情况下，在“Solve/Run”菜单中单击“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，选择“General”选项卡，勾选“Solve MoM with higher order basis functions (HOBF)”复选框，如图 4-26 所示。

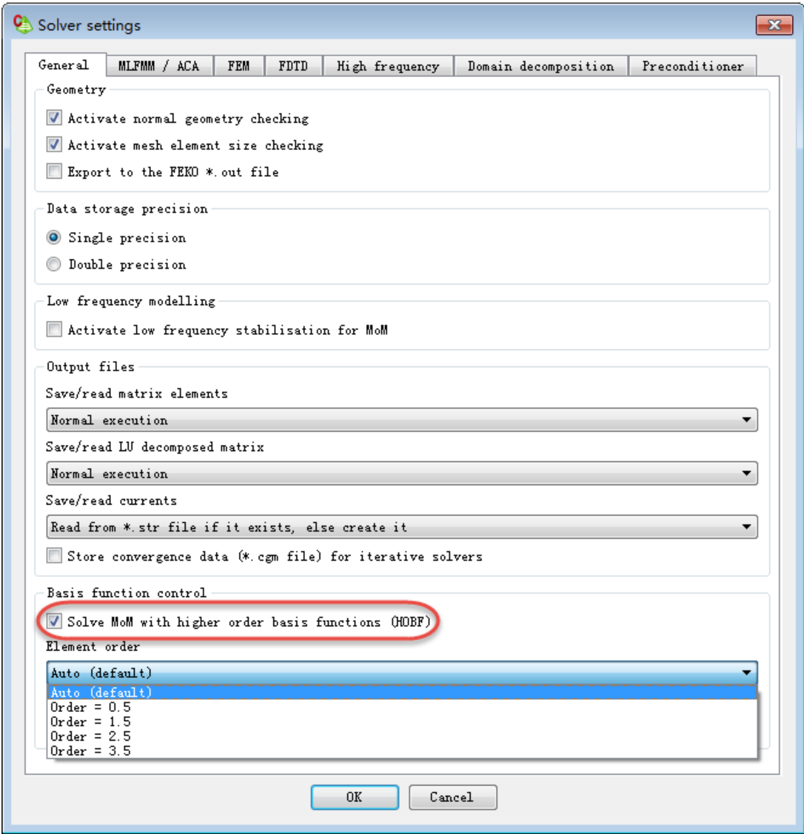


图 4-26　设置高阶方法

4. 有限元（FEM）

有限元法只适用于介质体，采用四面体网格，介质体的面可以是金属。设置步骤如下：

在左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选择几何模型，在左侧的“模型详细信息树形浏览器”中，展开“Regions”结点，选择所有的介质区域，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，单击“Solution”选项卡，在下拉列表框中，选择“Finite Element Method(FEM)”选项，如图 4-27 所示。

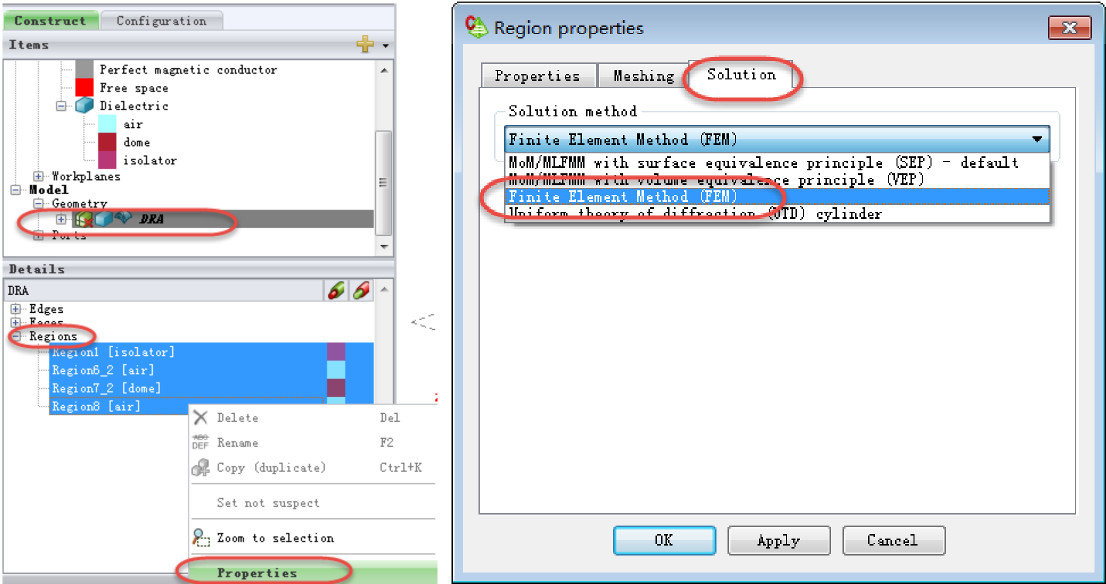


图 4-27　设置有限元法

如果也同时设置了 MLFMM 方法，那么当前问题就采用的是 MLFMM+FEM 混合技术，该混合技术非常适用于包含介质的微带天线在载体上的天线布局问题计算。

可参考光盘自带的工程“…/chapter4/solver/fem/DRA_Finite_Modal.cfx”了解有限元方法的设置。

5. 时域有限差分（FDTD）

时域有限差分可以用来计算金属、介质的辐射和散射问题，在没有设置其他计算方法的时候，可以单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，单击“FDTD”选项卡，勾选“Activate the finite difference time domain (FDTD) solver”复选框，如图 4-28 所示。

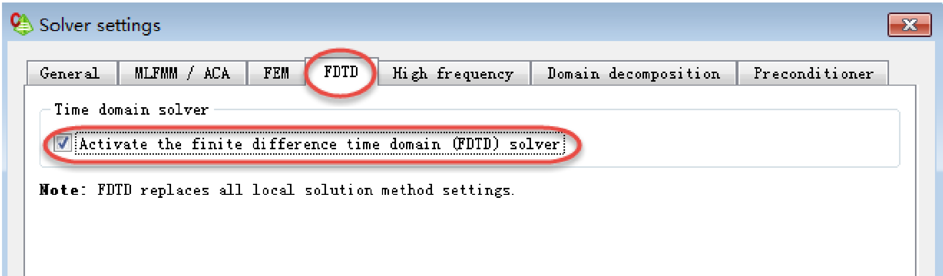


图 4-28　设置时域有限差分法

6. 多导体传输线法（MTL）

通过 CableModeling 方法定义了线缆束，在计算的时候会自动采用 MTL 技术，其他的载体模型，如车辆、飞机等系统，可以选择 MoM 或 MLFMM 来进行系统环境场的计算。

7. 高频物理光学法（PO）、大面元物理光学法（LEPO）、射线几何光学法（RL-GO）

高频方法适用于大的载体表面面元或反射面天线的非馈源部分。

物理光学法和大面元物理光学法可以混合使用，没有设置为高频算法的其他所有面元，将采用 MoM 或 MLFMM（如果设置了多层快速多极子法）；物理光学法和大面元物理光学法也支持与远场等效源或口面近场等效源法混合。

射线几何光学法可以是金属面和介质面，不能与其他高频方法混合，没有设置为高频算法的其他所有面元，将自动采用 MoM；射线几何光学法对应的面元可以采用较粗的网格（没有小于 lam/3 的限制）；不建议处理矩量法区域较大的问题，建议采用远场等效法，不建议用于口面场采样点数多的问题。

高频方法的设置，必须在模型的面元上进行设置，详细步骤如下：

1）在左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选择几何模型，在左侧的“模型详细信息树形浏览器”中，展开“Faces”结点，选择所有需要设置高频方法的面元，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，选择“Solution”选项卡。

2）在“Solve with special solution method”下拉列表框中选择高频求解技术，如图 4-29 所示。

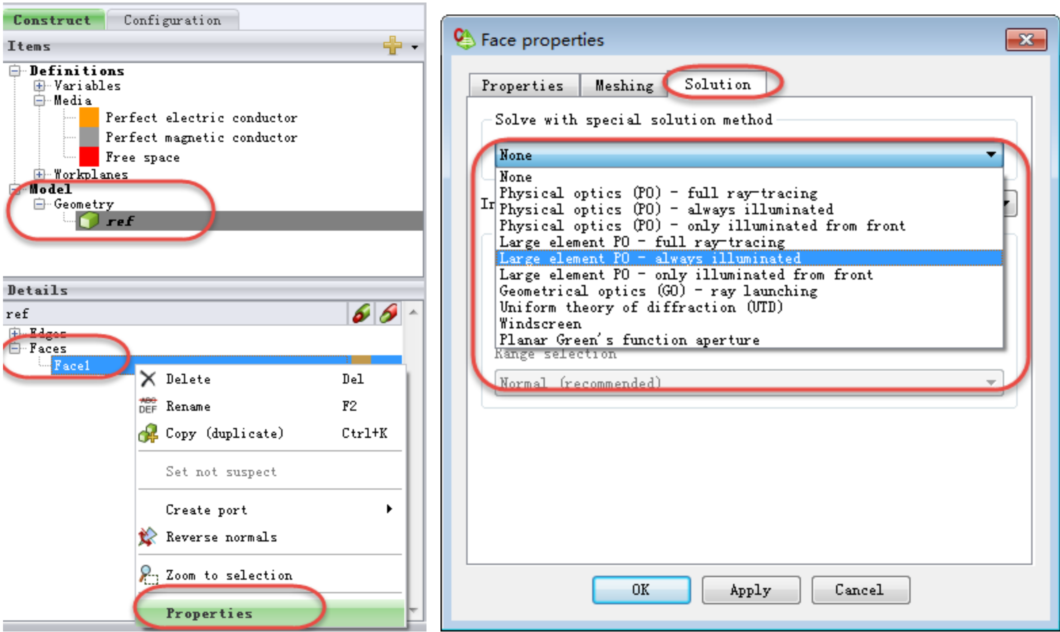


图 4-29 设置高频方法

可参考随书配带资源中的工程“…/chapter4/solver/high_frequency/*.cfx”了解各种高频算法的使用与设置。

FEKO 软件提供了丰富的计算方法，可以根据问题的类型、电尺寸的大小以及材料属性等来灵活选择计算求解器，根据上述对各种方法选择的介绍，在表 4-4 中对主要应用方向的典型问题给出了可以选择的方法。

表 4-4　主要应用与计算方法的选择列表

应用方向：典型问题	可选择的方法	备注
线天线及其阵列	MoM	
波导天线	MoM、MLFMM，也可以选择 FEM 或 FDTD	
微带天线单元	MoM、MLFMM、FEM 或 FDTD	
阵列天线——大型波导缝隙阵（内部填充空气，设为有限元）	MLFMM+FEM 或 MLFMM+CFIE	如果采用 MLFMM，可以考虑把大的光滑平面设为 CFIE
阵列天线——微带阵列	FDTD、MLFMM+FEM 或 MLFMM	
反射面天线（单反、卡式天线、偏馈反射面、赋形反射面等）	MoM+PO/LEPO/RL-GO MLFMM+PO/LEPO 等效源（远场等效或口面近场等效）+PO/LEPO/RL-GO 等效源（远场等效或口面近场等效）+MLFMM	
透镜天线、THz 天线	MLFMM 等效源+RL-GO	
微带天线+载体天线布局	MLFMM（载体部分）+FEM（天线部分） MLFMM（天线与天线附近载体）+PO/LEPO（载体部分）	
线缆束+环境	MTL（线缆部分）+MoM(环境) MTL（线缆部分）+MLFMM(环境)	
天线罩	MLFMM 等效源+RL-GO	
FSS 单元快速设计	MoM+PBC+TR Tool	

对于目标体隐身可以根据电尺寸大小，选择 MoM、MLFMM、MLFMM+PO/LEPO、PO/LEPO 以及 RL-GO 等。RL-GO 可以分析金属、涂覆以及介质问题。

4.4　主要的求解参数设置

4.4.1　近场设置

FEKO 软件支持近场计算功能，必须在 CADFEKO 中进行设置。这里的近场是指确定位置上的电、磁场分布，与天线手册上的近场定义有一定的区别，可以在直角坐标系、球坐标系、柱坐标系等定义采样近场点。

近场设置多应用于电磁兼容（关心空间场强分布，尤其是敏感设备所处的位置）、空间电波传播、波导设计（关心波导内部不同模式的场分布）和天线的口面场分布（可导出文件作为等效源）以及空间散射近场等。

在 CADFEKO 中左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选择“Configuration”选项卡，展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Near fields”选项，弹出“Request near fields”对话框。

在“Position”选项卡中，可以选择坐标系类型，并在选中坐标系类型后，设置采样区间和场点，如图 4-30 所示。

在“Workplane”选项卡中，设置采样平面的相对工作坐标系。

在“Scope”选项卡中，设置要考虑哪些面元的空间辐射场或散射场，如图 4-31 所示。

在“Advanced”选项卡中，设置计算结果是否输出到指定格式的文件，如图 4-32 所示。

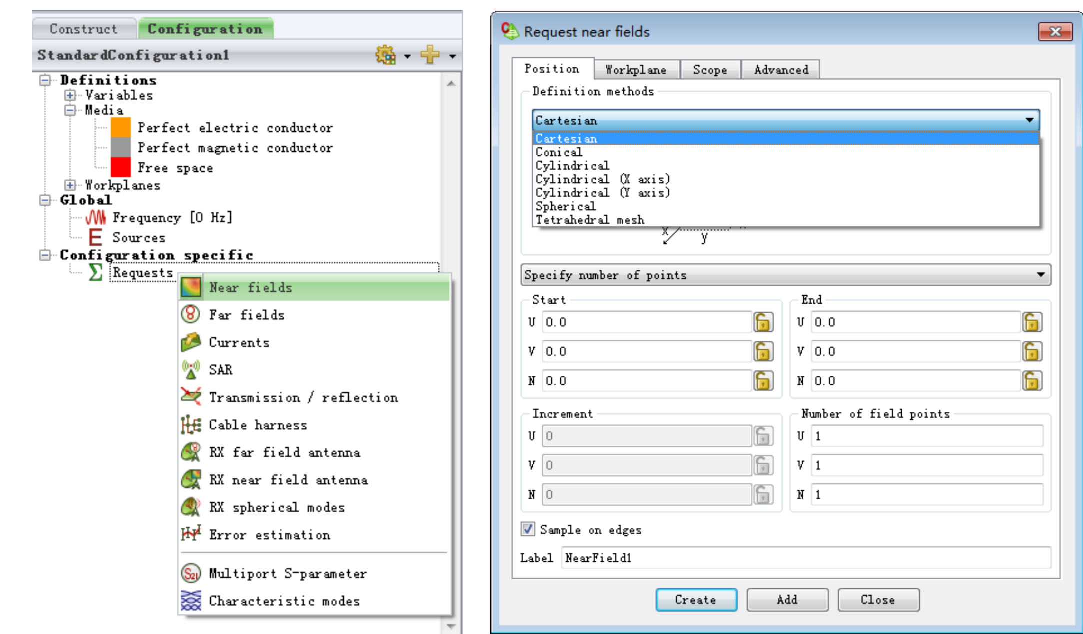


图 4-30 设置近场，在“Position”选项卡中选择坐标系类型和采样范围

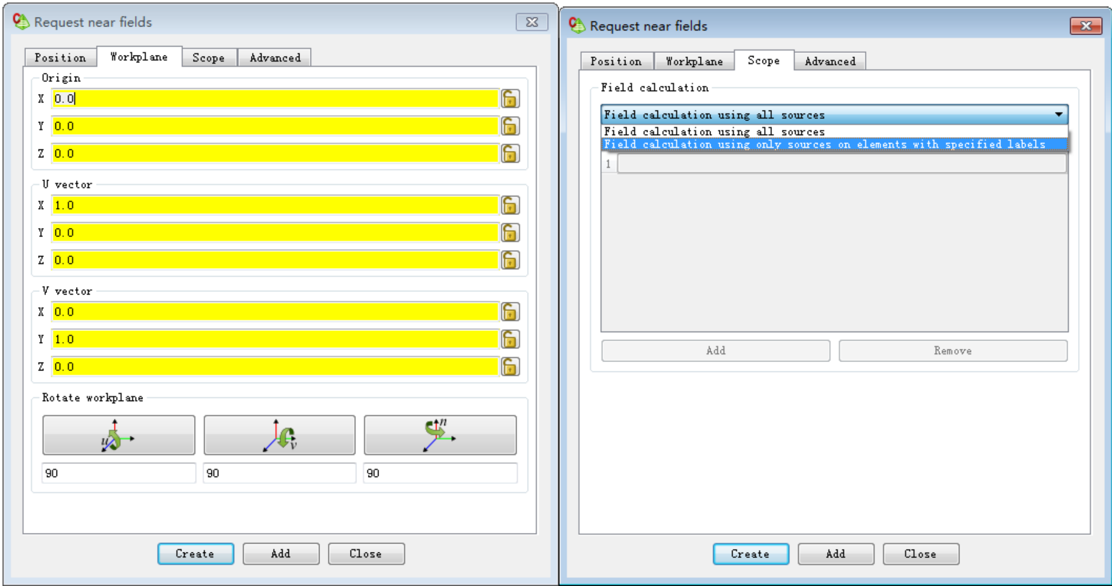


图 4-31 设置近场，在“Scope”选项卡中选择面元的标签号

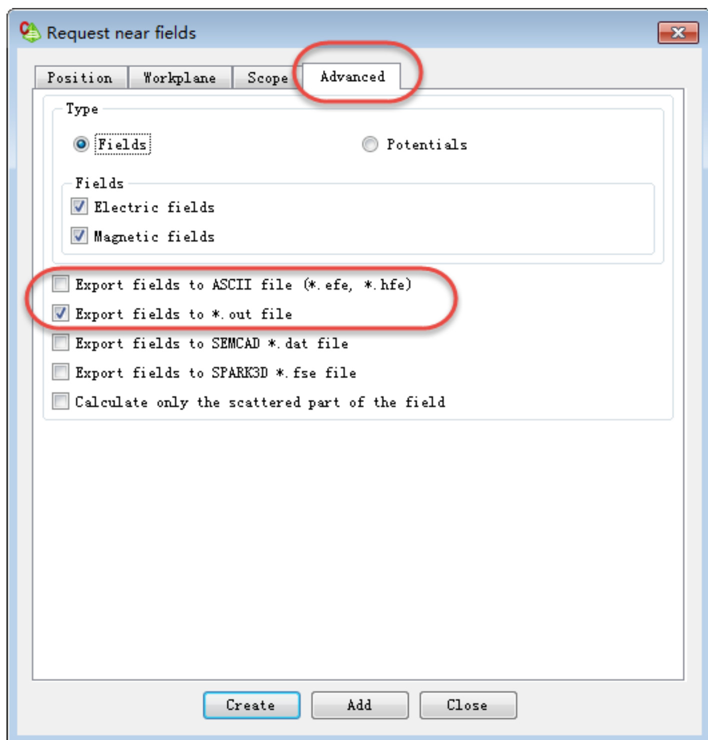


图 4-32　设置近场，在“Advanced”选项卡中设置计算结果的输出

4.4.2　远场设置

FEKO 软件支持远场计算功能，必须在 CADFEKO 中进行设置。这里的远场是指确定方向无限远处的场（单位为 V），与天线手册上的远场定义也有一定的区别，只针对球坐标系。该设置完成后，对于天线的仿真，会直接得到天线增益、方向性系数、效率、轴比等参数。

远场设置多应用于天线设计、天线布局以及 RCS 分析。

在 CADFEKO 中左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选择“Configuration”选项卡，展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框。

在“Position”选项卡中，可以选择坐标系类型，并在选中坐标系类型后设置采样区间和场点，如图 4-33 所示。

在“Workplane”选项卡中，设置采样平面的相对工作坐标系。

在“Scope”选项卡中，设置要考虑哪些面元（通过 Label 来识别）的空间辐射场或散射场，如图 4-34 所示。

在“Advanced”选项卡中，设置计算结果是否输出到指定格式的文件，如图 4-35 所示。

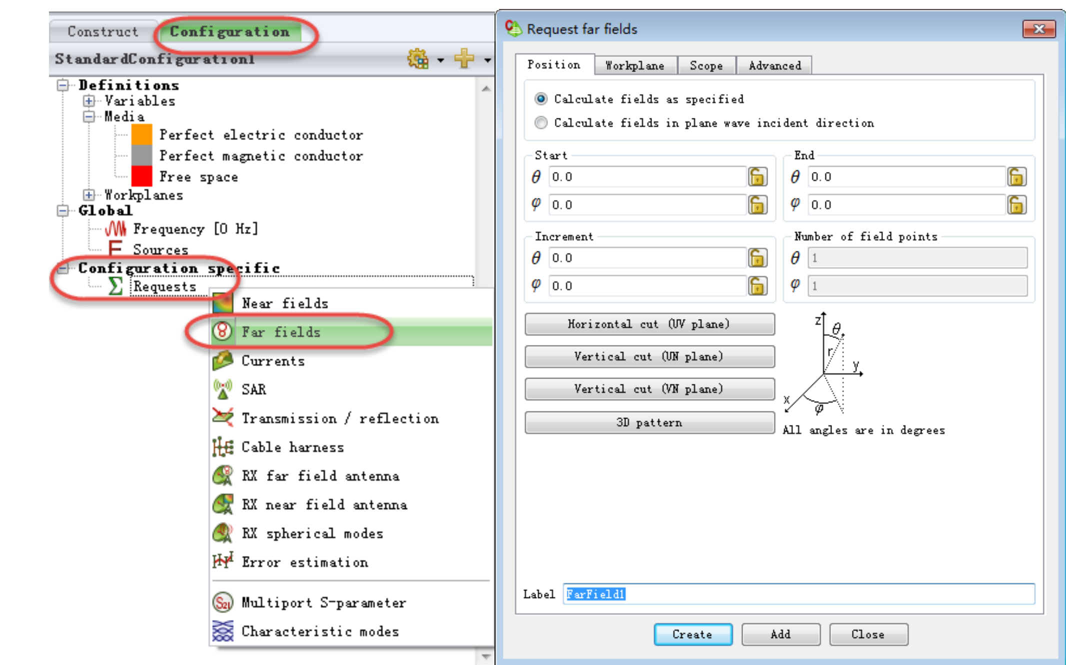


图 4-33　设置远场，在“Position”选项卡中设置区间和采样步长

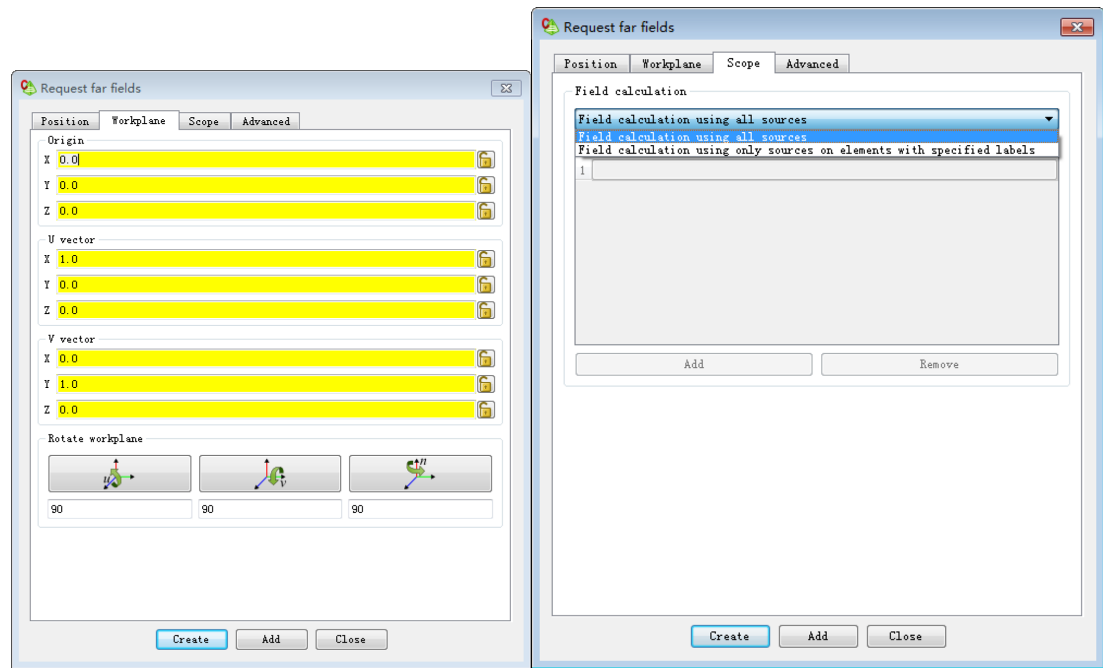


图 4-34　设置远场，在“Scope”选项卡中选择面元的标签号

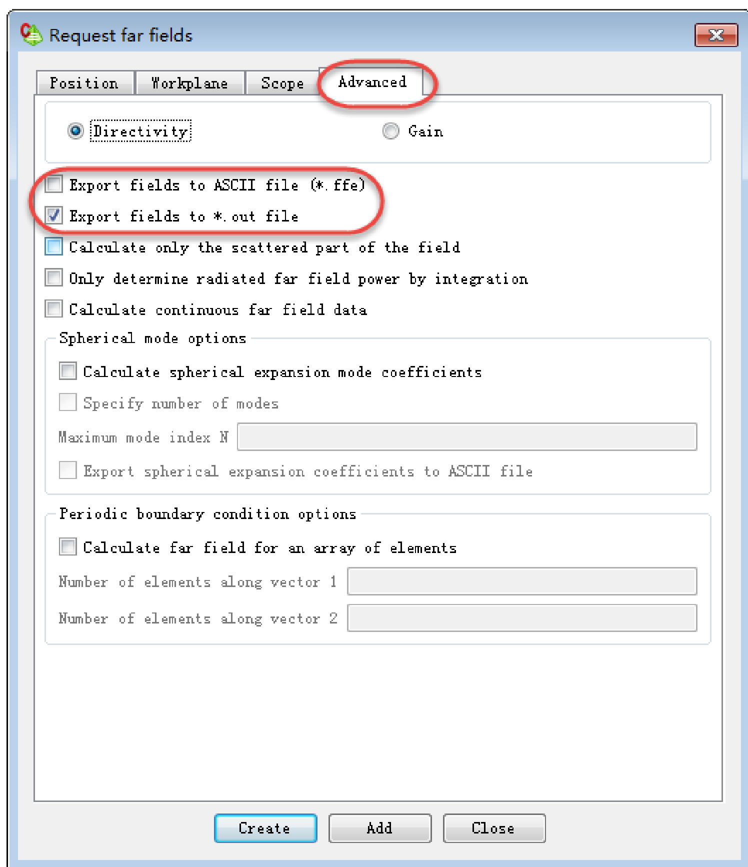


图 4-35　设置远场，在“Advanced”选项卡中设置计算结果的输出

4.3 S参数求解设置

FEKO 软件支持多端口 S 参数计算功能，必须在 CADFEKO 中进行设置。设置了 S 参数计算，就不需要在端口加激励信号。

S 参数设置多应用于多天线隔离度的计算以及波导多端口的隔离与耦合。

求解设置非常简单：在 CADFEKO 中左侧的“模型与求解树形浏览器”中，选择“Configuration”选项卡，展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Multiport S-parameter”选项，弹出“Request S-parameters”对话框。

如图 4-36 所示，可以设置多个端口，设置每个端口的参考阻抗和是否设置为有源端口（如果把端口 1 勾选了 Active，那么在计算的时候就会在端口 1 上加信号，计算其他端口上的接收信号，从而得到 S21，S31……等；如果端口 1 没有勾选 Active，那么就不会得到 S21、S31……）。

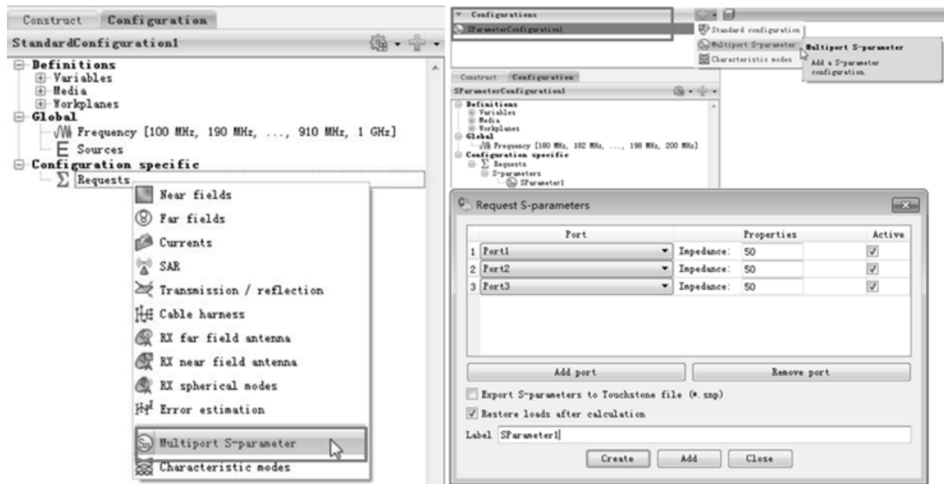


图 4-36　设置 S 参数计算

4.5　LUA脚本基础与应用

CADFEKO 和 POSTFEKO 集成了一种强大的、高效的轻量级脚本语言——LUA，允许用户利用脚本来创建模型、得到仿真结果和模型配置信息等。脚本接口或应用程序接口（API）也允许用户从外部脚本控制 CADFEKO 和 POSTFEKO，该脚本和 VBA 相似。内置的脚本编辑器使得编辑脚本非常简单，包括了许多脚本调试功能，如断点-暂停脚本执行的功能。

需要注意的是，LUA 脚本区分大小写，在 FEKO 14.0 进行更新后，在 LUA 脚本编辑器中就可以支持中文字符的输入。

LUA 是一种小巧的脚本语言，是巴西里约热内卢天主教大学（Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro）里的一个研究小组，由 Roberto Ierusalimschy、Waldemar Celes 和 Luiz Henrique de Figueiredo 组成并于 1993 年开发。其设计目的是为了嵌入应用程序中，从而为应用程序提供灵活的扩展和定制功能。LUA 由标准 C 语言编写而成，几乎在所有操作系统和平台上都可以编译、运行。LUA 脚本可以很容易地被C/C++ 代码调用，也可以反过来调用 C/C++的函数，这使得 LUA 在应用程序中可以被广泛应用。

LUA 的语法相似于 Python 和 Matlab（或 Octave），易于学习和使用。在网络上可以发现很多 LUA 的功能模块，可以下载、安装到本地，并在 FEKO 中直接使用。利用 LUA 脚本的 luacom 模块可以很方便地控制应用程序，如利用组件对象模型（COM）接口调用 Excel 和 Word 应用，在 LUA 基础部分会举例说明 COM 的使用方法。也有许多模块用于处理计算结果，从 CSV 或 XML 格式（LuaExpat 模块用于 XML 格式解析）文件读取数据，写入数据到 CSV 或 XML 格式的文件中。

4.5.1　LUA脚本基础

对于 LUA 脚本的学习，网络资源和 FEKO 的用户手册是大家可以随时利用和查阅的，为方便大家学习，作为入门内容的一部分，这里将简要介绍 LUA 脚本的基本语法，并通过实例

学习，帮助读者快速掌握和理解，对于具有编程经验的用户，这一部分就更易于掌握了。

1. 注释（Comments）

为了便于阅读脚本，支持脚本的注释功能，参考下面的例子，有两种方式来对脚本添加注释说明。

单行注释方法：在注释行前边加入“--”字符。

多行注释方法：以“—[[”字符开始，结尾加入“]]”。

1）LUA 脚本例子 1：

```
 -- This is a single line comment
 -- [[ This is
a multi line comment]]
变量定义赋值(Variable assignments)
```

下面的例子 2 说明了如何对变量进行赋值。

2）LUA 脚本例子 2：

```
-- Note: All number types are doubles. There are no integers.
print(type(42), type(42.0)) -- prints out "number number"
variable_one = 1 + 2 - 3 -- This will equal zero.
variable_One = "Variables are case sensitive."

a, b = 42, 101 --multiple assignment
a, b = b, a --provides quick value swap
x, y, z = 1, 2, 3, "this value is discarded"
x, y, z, mytext = 1, 2, 3, "this value is discarded"
```

LUA 字符串（Strings）：字符串是一个由字符组成的序列，是一种非常常用的高级类型，字符串可以通过以下 3 种形式被初始化，其中包括：

- 单引号之间的字符。
- 双引号之间的字符。
- “[[”与“]]”之间的字符。

3）LUA 脚本例子 3：

```
string1="Lua"
print("\"string 1 is\"",string1)
string2 ='Tutorial'
print("String 2 is",string2)
string3=[["Lua Tutorial!"]]
print("String 3 is", string3)
string4=[[Lua Tutorial!]]
print("String 4 is", string4)
```

当运行上述程序时，会得到如下输出：

```
"string 1 is"Lua
String 2 is   Tutorial
String 3 is   "Lua Tutorial!"
String 4 is   Lua Tutorial!
```

转义字符（Escape Sequence）是指，用一些普通字符的组合来代替一些特殊字符，由于其组合改变了原来字符表示的含义，因此称为“转义”。LUA 中的主要转义字符见表 4-5。

表 4-5　LUA 中的主要转义字符

转义序列	意义	转义序列	意义
\n	换行（new line）	\’	单引号（apostrophe）
\\	反斜杠（backslash）	\[	左方括号（left square bracket）
\”	双引号（quotation mark）	\]	右方括号（right square bracket）

4）LUA 脚本例子 4：

```
string1 = "Lua"
print("\[String 1 is\]:",string1)

string1 = "Tutorial!"
print("\\String 2 is\\:",string1)

string3 = "\"Tutorial!\""
print("\"String 2 is\":",string3)

string4="\nhello\nworld!"
print("String 3 is:",string4)
```

当运行上面的程序时，会得到如下输出：

```
[String 1 is]:      Lua
\String 2 is\:      Tutorial!
"String 2 is":"Tutorial!"
String 3 is:
hello
world!
```

LUA 脚本支持字符串赋值和字符串连接操作等。更多高级字符串操作均可以借助于字符串模块（FEKO 安装完后会提供字符串模块，可参考安装目录“…\Altair\14.0\feko\shared\lua\pl\stringx.lua”），如表 4-6。

表 4-6　字符串模块

序号	方法与用途
1	string.upper(argument): 返回参数的大写表示
2	string.lower(argument): 返回参数的小写表示
3	string.gsub(mainString,findString,replaceString)：返回一个字符串，通过 replaceString 替换查找字符串的出现
4	string.strfind(mainString,findString,optionalStartIndex,optionalEndIndex)： 如果未找到，则返回该查找字符串在主字符串和零的起始索引与结束索引
5	string. reverse(arg)：返回一个字符串，通过反转传递的字符串的字符
6	string. format(...)：返回一个格式化字符串
7	string. char(arg) and string.byte(arg)：返回输入参数、内部的数字和字符表示
8	string. len(arg)：返回传递的字符串的长度
9	string. rep(string, n))：返回一个字符串，通过重复相同的字符串 *N* 次
10	..：引用两个句号运算符连接两个字符串

5）LUA 脚本例子 5：字符串大写与小写表示。

```
--String upper()& lower() functions
string1 = "Lua Tutorial!";
print(string.upper(string1))
print(string.lower(string1))
```

运行上述脚本，得到如下输出：

```
LUA TUTORIAL!
lua tutorial!
```

6）LUA 脚本例子 6：字符串查找与替换操作。

```
--string.gsub() function
string = "Lua Tutorial"
string1="Tutorial"
string2="Language"
-- replacing strings
newstring = string.gsub(string,string1,string2)
print("The new string is",newstring)
```

运行上述脚本，得到如下输出：

```
The new string is    Lua Language
```

7）LUA 脚本例子 7：字符串的其他操作。

```
--string other functions:
string1 = "Lua"
string2 = "Tutorial"
-- String Concatenations using ..
print("Concatenated string is: ",string1..string2)

-- Length of string
print("the Length of string1 is: ",string.len(string1))

-- Repeating strings
repeatedString = string.rep(string1,5)
print(repeatedString)
```

运行上述脚本，得到如下输出：

```
Concatenated string is: LuaTutorial
the Length of string1 is:3
LuaLuaLuaLuaLua
```

2．LUA运算符（Operator）

运算符用于执行程序代码运算，会针对一个以上操作数项目来进行运算。在一个表达式

中可能包含多个由不同运算符连接起来的、具有不同数据类型的数据对象。由于表达式有多种运算，因此不同的运算顺序可能得出不同结果，甚至出现错误运算结果，因为当表达式中含有多种运算时，必须按一定顺序进行结合，才能保证运算的合理性和结果的正确性、唯一性。LUA 中有丰富的内置运算符，且运算符提供了以下类型：算术运算符（见表 4-7）、关系运算符（见表 4-8）、逻辑运算符（见表 4-9）、其他运算符（见表 4-10）等。

表 4-7　算术运算符

运算符	功能描述	示例：A=10，B=21
+	两个操作数相加	A+B=31
-	从所述的第 1 个操作数减去第 2 个操作数	A-B=-11
*	两个操作数相乘	A*B=210
/	通过分子除以分母	B/A=2.1
%	模运算和整数除法后的余数	B%A=1
^	指数运算符需要的指数	A^2=100
-	一元运算，此运算符相当于取反	-B=-21

表 4-8　关系运算符

运算符	功能描述	示例：A=10，B=21
= =	检查，两个操作数的值是否相等，如果是，则条件变为真	(A = = B) 为false
～=	检查，两个操作数的值是否相等，如果值不相等，则条件变为真	(A ～= B) 为 true
>	检查，左操作数的值是否大于右操作数的值，如果是，则条件成立	(A > B) 为 false
<	检查，左操作数的值是否小于右操作数的值，如果是，则条件成立	(A < B) 为 true
>=	检查，左操作数的值是否大于或等于右操作数的值，如果是，则条件成立	(A >= B) 为 false
<=	检查，左操作数的值是否小于或等于右操作数的值，如果是，则条件成立	(A <= B) 为 true

表 4-9　逻辑运算符

运算符	功能描述	示例：A=true，B=false
and	逻辑与运算符。如果两个操作数都不为零，则条件成立	(A and B) 为 false
or	逻辑或运算符。如果有两个操作数不为零，则条件变为真	(A or B) 为 true
not	逻辑非运算符，用于反转操作数的逻辑状态。如果一个条件为真，则逻辑非运算符将返回 false	!(A and B)为 true

表 4-10　其他运算符

运算符	功能描述	示例
..	连接两个字符串	a..b：当 a 的值为 "Good "、b 的值为 "Morning"时，会返回"GoodMorning"
#	一个一元运算符，返回一个字符串或一个表的长度	#"Good"：返回 4

3. LUA循环（Loop）

很多情况下需要做一些有规律性的重复操作，因此在程序中就需要重复执行某些语句。一组被重复执行的语句称为循环体，能否继续重复，取决于循环的终止条件。循环结构是在

一定条件下反复执行某段程序的流程结构，被反复执行的程序称为循环体。循环语句是由循环体及循环的终止条件两部分组成的。

LUA 语言提供的循环处理方式具体见表 4-11。

表 4-11　循环处理方式

循环类型	描述
while 循环	在条件为 true 时，让程序重复地执行某些语句。执行语句前会先检查条件是否为 true
for 循环	重复执行指定语句，重复次数可在 for 语句中控制
Lua repeat...until	重复执行循环，直到指定的条件为真时停止
循环嵌套	可以在循环内嵌套一个或多个循环语句（while、for、do…while）

LUA 编程语言中，while 循环语句在判断条件为 true 时会重复执行循环体语句。

LUA 编程语言中 while 循环语法：

```
while(condition)
do
    statements
end
```

statements(循环体语句) 可以是一条或多条语句，condition(条件) 可以是任意表达式，在 condition(条件) 为 true 时执行循环体语句。

以下实例循环输出 a 的值：

```
a=10
while( a < 20 )
do
    print("the value of a is:", a)
    a = a+1
end
```

LUA 编程语言中 for 循环语法格式:

```
for var=exp1,exp2,exp3 do
<执行体>
end
```

var 从 exp1 变化到 exp2，每次变化以 exp3 为步长递增 var，并执行一次“执行体”。exp3 是可选的，如果不指定，则默认为 1。

For 循环应用 1：

```
function f(x)
     print("function")
     return x*2
end
for i=1,f(5) do print(i)
end
```

for 循环应用 2：

```
days = {"Suanday","Monday","Tuesday","Wednesday","Thursday","Friday","Saturday"}
for i,v in ipairs(days) do
print(v)
end
```

4. LUA数组（Arrays）

数组，就是相同数据类型的元素按一定顺序排列的集合，就是把有限个类型相同的变量用一个名字命名，然后用编号区分它们的变量的集合，这个名字称为数组名，编号称为下标。数组可以是一维数组和多维数组。

LUA 数组的索引键值可以使用整数表示，数组的大小不是固定的。

1）一维数组，是最简单的数组，其逻辑结构是线性表。一维数组可以用 for 循环出数组中的元素，示例如下：

```
array = {"Lua", "Tutorial"}
for i= 0, 2 do
    print(array[i])
end
```

以上代码执行输出结果为：

```
nil
Lua
Tutorial
```

我们可以使用整数索引来访问数组元素，如果知道的索引没有值，则返回 nil。

LUA 索引值以 1 为起始，但也可以指定从 0 开始。除此之外，还可以以负数为数组索引值，示例如下：

```
array = {}
for i= −2, 2 do
    array[i] = i *2
end
for i = −2,2 do
    print(array[i])
end
```

2）多维数组，即数组中包含数组或一维数组的索引键对应一个数组。以下是一个 3 行 3 列的阵列多维数组示例：

```
array = {}
for i=1,3 do
    array[i] = {}
        for j=1,3 do
            array[i][j] = i*j
        end
```

```
end
-- access the array
for i=1,3 do
    for j=1,3 do
        print(array[i][j])
    end
end
```

不同索引键的 3 行 3 列阵列多维数组示例如下：

```
-- initialize the array
array = {}
maxRows = 3
maxColumns = 3
for row=1,maxRows do
    for col=1,maxColumns do
        array[row*maxColumns +col] = row*col
    end
end
-- access the array
for row=1,maxRows do
    for col=1,maxColumns do
        print(array[row*maxColumns +col])
    end
end
```

数组设定了指定的索引值，这样可以避免出现 nil 值，有利于节省内存空间。

5. LUA表格（Tables）

table 是 LUA 的一种数据结构，用来帮助用户创建不同的数据类型，如数组、字典等。

LUA table 使用关联型数组，用户可以用任意类型的值来作为数组的索引，但这个值不能是 nil。LUA table 是不固定大小的，用户可以根据需要自行扩容。

构造器是创建和初始化表的表达式。表是 LUA 特有的功能强大的东西。最简单的构造函数是{}，用来创建一个空表。用户可以直接初始化数组，示列如下：

```
-- initialize the table
mytable = {}
-- specify the value for table
mytable[1]= "Lua"
-- remove the reference
mytable = nil
-- luagarbage collection and release the memeory
```

下边的脚本演示了如何提取 Table 的元素个数以及如何使用 inspect 函数读取 Table 元素：

```
an_array = {1,1,2,3,5,8,13}
```

```
print(#an_array) -- prints "7"
print(an_array[3]) -- prints "2"
a_table = {['bread'] = "brown", ['eggs'] = 10} -- tables are dictionaries or arrays
print(a_table['bread']) -- "prints brown"
print(a_table) -- prints "table: 0x7f63c8001200", the memory location of the table
inspect(a_table) -- prints the contents of the table
print(#a_table) -- prints "0" since it is not an array (take note)
```

先定义 table a 并设置其元素，然后将 a 赋值给 b，则 a 与 b 都指向同一个内存。如果 a 设置为 nil，则 b 同样能访问 table 的元素。如果没有指定的变量指向 a，则 LUA 的垃圾回收机制会清理相对应的内存。请看如下示例代码：

```
-- simple table
mytable = {}
print("the type of mytable is: ",type(mytable))
mytable[1]= "Lua"
mytable["wow"] = "modify before"
print("the element in mytable when the index is 1 is:", mytable[1])
print("the element in mytable when then index is wow is: ", mytable["wow"])
-- alternatetable&mytable is referred to the same table
alternatetable = mytable
print("the lement in alternatetable when the index is 1 is: ", alternatetable[1])
print("the element in mytable when the index is wow is:    ", alternatetable["wow"])
alternatetable["wow"] = "after modify"
print("the element in mytable when the index is wow is: ", mytable["wow"])
-- Release the variable
alternatetable = nil
print("alternatetable is: ", alternatetable)
-- mytable can be accessible
print("the element in mytable when the index is wow is:", mytable["wow"])
mytable = nil
print("mytable is: ", mytable)
```

以上代码的执行输出结果为：

```
the type of mytable is:        table
the element in mytable when the index is 1 is:       Lua
the element in mytable when then index is wow is:  modify before
the lement in alternatetable when the index is 1 is:  Lua
the element in mytable when the index is wow is:    modify before
the element in mytable when the index is wow is:    after modify
alternatetable is:    nil
the element in mytable when the index is wow is:    after modify
mytable is:           nil
```

Table 中的常用几种操作见表 4-12。

表 4-12　Table 中的常用操作

序号	方法与用途
1	table.concat (table [, step [, start [, end]]])：concat 是 concatenate（连接）的缩写；table.concat 函数列出参数中指定 table 的数组部分从 start 位置到 end 位置的所有元素，元素间以指定的分隔符(sep)隔开
2	table.insert (table, [pos,] value)：在 table 的数组部分指定位置（pos）插入值为 value 的一个元素。pos 参数可选，默认为数组部分末尾
3	table.remove (table [, pos])：返回 table 数组部分位于 pos 位置的元素，其后的元素会被前移。pos 参数可选，默认为 table 长度，即从最后一个元素删起
4	table.sort (table [, comp])：对给定的 table 进行升序排序

接下来请看如下这几个方法的实例。

1）Table 连接：利用 concat 方法，代码如下。

```
fruits = {"orange","banana","apple"}
-- Return the concated string in table
print("Concated string is: ",table.concat(fruits))
-- specify the concated string
print("Concated string is: ",table.concat(fruits,", "))
-- spcify the index to concate table
print("Concated string is: ",table.concat(fruits,", ", 2,3))
```

2）插入和删除：利用 insert 和 remove 方法，代码如下。

```
fruits = {"banana","orange","apple"}
-- Inserted in the end
table.insert(fruits,"mango")
print("When the index is 4,the element is: ",fruits[4])
-- Insert new element when Index is 2
table.insert(fruits,2,"grapes")
print("When the index is 2,the element is:    ",fruits[2])
print("the last element is: ",fruits[5])
table.remove(fruits)
print("when remove the last element,the last element is: ",fruits[5])
```

3）排序：利用 sort 方法，代码如下。

```
fruits = {"banana","orange","apple","grapes"}
print("Sort before")
for k,v in ipairs(fruits) do
    print(k,v)
end
table.sort(fruits)
print("Sort after")
for k,v in ipairs(fruits) do
    print(k,v)
end
```

6. LUA函数（Function）

在 LUA 中也可以创建和使用函数功能。函数是对语句和表达式进行抽象的主要方法，

它们既可以用来处理一些特殊的工作，也可以用来计算一些值。

LUA 提供了许多的内建函数，用户可以很方便地在程序中调用它们，如函数 print()可以将传入的参数打印在控制台上。

LUA 函数主要有两种用途：

1）完成指定的任务，这种情况下函数作为调用语句使用。

2）计算并返回值，这种情况下函数作为赋值语句的表达式使用。

LUA 编程语言函数定义的格式如下：

```
optional_function_scope function function_name( argument1, argument2, argument3..., argumentn)
    function_body
    return result_params_comma_separated
end
```

解析：

- optional_function_scope，该参数是可选的，制订函数是全局函数还是局部函数，未设置该参数默认为全局函数，如果需要设置函数为局部函数需要使用关键字 local。
- function_name，指定函数名称。
- argument1，argument2，argument3，…，argumentn，是函数参数，多个参数以逗号隔开，函数也可以不带参数。
- function_body，即函数体，函数中需要执行的代码语句块。
- result_params_comma_separated，是函数返回值，LUA 语言函数可以返回多个值，每个值以逗号隔开。

下边的例子说明了如何创建和使用一个函数，同样重要的是，要注意局部（Local）和全局（Global）变量定义的使用范围。建议尽量使用局部变量定义。

示例 1：

```
function myFunction(name)
    print('Hello ' .. name)
    var1 = 100
    local var2 = 99
    return "returns nil if you don't have a return statement."
end
myFunction('FEKO user')
print(var1) -- prints 100
print(var2) -- prints nil, since var2 does not exist outside the function
```

示例 2：此例定义了函数 max()，参数为 num1, num2，用于比较两值的大小，并返回最大值。

```
--[[ function returns the maximum value of the two values --]]
function max(num1, num2)
   if (num1 > num2) then
      result = num1;
   else
```

```
        result = num2;
    end
    return result;
end
-- Call function
print("The maximum value of the two value is: ",max(10,4))
print("The maximum value of the two value is: ",max(5,6))
```

示例 3：多返回值，LUA 函数可以返回多个结果值，如 string.find，其返回匹配串“开始和结束的下标”（如果不存在匹配串则返回 nil）。

```
s, e = string.find("FEKO is a comprehensive EM simulation software tool", "EM")
print(s,e)
```

示例 4：LUA 函数中，在 return 后列出要返回的值的列表即可返回多值。

```
function maximum (a)
    local mi = 1                -- the index of the maximum value
    local m = a[mi]             -- the maximum value
    for i,val in ipairs(a) do
        if val > m then
            mi = i
            m = val
        end
    end
    return m, mi
end
print(maximum({8.5,21.3,22.8,12,5}))
```

示例 5：可变参数，LUA 函数可以接受可变数目的参数，和 C 语言类似，在函数参数列表中使用 3 个点（...）表示函数有可变的参数。LUA 将函数的参数放在一个叫 arg 的表中，#arg 表示传入参数的个数。

```
function average(...)
    result = 0
    local arg={...}
    for i,v in ipairs(arg) do
        result = result + v
    end
    print("the total input includes: " .. #arg .. " Numbers.")
    return result/#arg
end
print("The average value is: ",average(10.2,5.8,3.32,8,4,6.6))
```

7. LUA文件I/O

LUA I/O 库用于读取和处理文件，分为简单模式（和 C 语言一样）和完全模式。

1）简单模式（simple model）拥有一个当前输入文件和一个当前输出文件，并且提供针对这些文件相关的操作。

2）完全模式（complete model）使用外部的文件句柄来实现。它以一种面向对象的形式，将所有的文件操作定义为文件句柄的方法。

简单模式在做一些简单的文件操作时较为合适，但是在进行一些高级的文件操作的时候，简单模式就显得力不从心。例如，同时读取多个文件这样的操作，使用完全模式则较为合适。

打开文件操作语句如下：

```
file = io.open (filename [, mode])
```

mode 的取值见表 4-13。

表 4-13　mode 的取值描述

模式	描述
r	以只读方式打开文件，该文件必须存在
w	打开只写文件，若文件存在，则文件长度清零，即该文件内容会消失；若文件不存在，则建立该文件
a	以附加的方式打开只写文件。若文件不存在，则建立该文件；如果文件存在，则写入的数据会被加到文件尾，即文件原先的内容会被保留（EOF 符保留）
r+	以可读写方式打开文件，该文件必须存在
w+	打开可读写文件，若文件存在，则文件长度清零，即该文件内容会消失；若文件不存在，则建立该文件
a+	与 a 类似，但此文件可读、可写
b	二进制模式，如果文件是二进制文件，可以加上 b
+	表示对文件既可以读也可以写

（1）简单模式

简单模式使用标准的 I/O 或使用一个当前输入文件和一个当前输出文件。

以下为 file.lua 文件代码，操作的文件为 test.lua（如果没有，需要自行创建该文件），代码如下：

```
-- 以只读方式打开文件
file = io.open("test.lua", "r")
-- 设置默认输入文件为 test.lua
io.input(file)
-- 输出文件第一行
print(io.read())
-- 关闭打开的文件
io.close(file)
-- 以附加的方式打开只写文件
file = io.open("test.lua", "a")
-- 设置默认输出文件为 test.lua
io.output(file)
-- 在文件最后一行添加 LUA 注释
io.write("-- test.lua 文件末尾注释")
-- 关闭打开的文件
io.close(file)
```

在以上示例中我们使用了 io."x"方法，其中函数 io.read()中没有带参数，参数可以是表 4-14 中的一个。

表 4-14　参数描述

模式	描述
"*n"	读取一个数字并返回它，如 file.read("*n")
"*a"	从当前位置读取整个文件，如 file.read("*a")
"*l"（默认）	读取下一行，在文件尾（EOF）处返回 nil，如 file.read("*l")
number	返回一个指定字符个数的字符串，或在 EOF 时返回 nil，如 file.read(5)

其他的 I/O 方法如下：

1）io.tmpfile()，返回一个临时文件句柄，该文件以更新模式打开，程序结束时自动删除。

2）io.type(file)，检测 obj 是否为一个可用的文件句柄。

3）io.flush()，向文件写入缓冲中的所有数据。

4）io.lines(optional file name)：返回一个迭代函数，每次调用将获得文件中的一行内容，当到文件尾时，将返回 nil，但不关闭文件。

（2）完全模式

通常我们需要在同一时间处理多个文件，此时需要使用 file:function_name 来代替 io.function_name 方法。以下示例演示了如何同时处理同一个文件:

```
-- 以只读方式打开文件
file = io.open("test.lua", "r")
-- 输出文件第一行
print(file:read())
-- 关闭打开的文件
file:close()
-- 以附加的方式打开只写文件
file = io.open("test.lua", "a")
-- 在文件最后一行添加 LUA 注释
file:write("--test")
-- 关闭打开的文件
file:close()
```

其他方法如下：

1）file:seek(optional whence, optional offset)，设置和获取当前文件位置，成功则返回最终的文件位置（按字节），失败则返回 nil 加错误信息。参数 whence 值可以是：

- set——从文件头开始。
- cur——从当前位置开始（默认）。
- end——从文件尾开始。
- offset——默认为 0。

不带参数 file:seek()则返回当前位置，file:seek("set")则定位到文件头，file:seek("end")则定位到文件尾并返回文件大小。

2）file:flush()，向文件写入缓冲中的所有数据。

3）io.lines(optional file name)，打开指定的文件 filename 为读模式并返回一个迭代函数，每次调用将获得文件中的一行内容，当到文件尾时，将返回 nil 并自动关闭文件。

若不带参数时 io.lines()<=>io.input():lines(); 读取默认输入设备的内容，但结束时不关闭文件，如：

```
for line in io.lines("main.lua") do
    print(line)
end
```

以下示例使用了 seek 方法，定位到文件倒数第 25 个位置并使用 read 方法的*a 参数，即从当前位置（倒数第 25 个位置）读取整个文件。

```
-- 以只读方式打开文件
file = io.open("test.lua", "r")
file:seek("end",-25)
print(file:read("*a"))
-- 关闭打开的文件
file:close()
```

4.5.2 FEKO的LUA脚本功能

FEKO 提供了 LUA 的脚本功能，在前处理 CADFEKO 和后处理 POSTFEKO 中均集成了 LUA 脚本编辑器 Script editor，如图 4-37 所示。在脚本编辑器中可以输入或编辑脚本，支持断点设置进行调试，可直接运行输出结果。



图 4-37 FEKO 的 LUA 脚本编辑器

FEKO 脚本编辑器的启动方法非常简单，即在 CADFEKO 或 POSTFEKO 的“Home”菜

单中单击“Script editor”按钮，即可弹出脚本编辑器，如图 4-38 和图 4-39 所示。

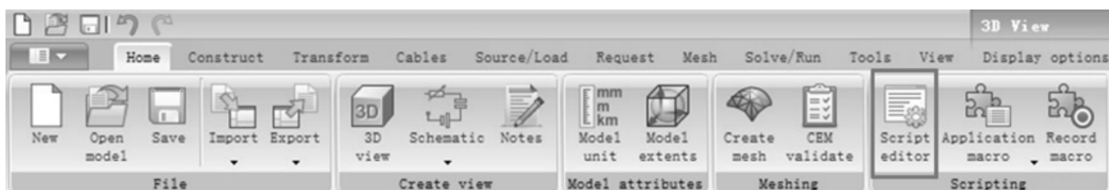


图 4-38　CADFEKO 中启动脚本编辑器



图 4-39　POSTFEKO 中启动脚本编辑器

FEKO网站提供了部分脚本，网址为https://www.feko.info/support/lua-scripts，可直接下载。

1. LUA脚本在CADFEKO中的使用

CADFEKO 可以基于 LUA 脚本来完成求解之前所有的工作，主要包括参量定义、材料定义、建立模型（包括导入几何模型或网格）、赋材料属性、端口定义、工作频率设置、求解方法设置、求解参数设置以及网格生成等，为了提高代码生成的效率，CADFEKO 支持脚本宏的录制功能（Record macro），单击“Record macro”按钮后，CADFEKO 按照单击按钮功能的顺序，自动生成 LUA 脚本，完成操作再次单击“Record macro”按钮后，会自动弹出脚本编辑器，查看生成的脚本，非常方便。同时，由于 LUA 脚本语法简单，易读性强，因此非常有助于用户理解和修改脚本。对于初学者，也有助于掌握 LUA 脚本。

这里给出的例子就是利用宏录制功能快速生成的脚本，可以直接复制下边几个部分的脚本到脚本编辑器，或直接读取光盘目录“../scripts/cadfeko/”中的“cadfeko_macro_record.lua”文件，直接运行。

示例：CADFEKO 录制宏。

第 1 部分是创建 CADFEKO 的一个应用 app（cf 代表 CADFEKO 的一个接口），并生成一个工程 project：

```
--CADFEKO14.0-273612 (x64)
app = cf.GetApplication()
project = app:NewProject()
```

第 2 部分是设置长度单位为毫米（mm）：

```
-- Modified solution entity: Model unit
properties = project:GetProperties()
properties.ModelAttributes.Unit = cf.Enums.ModelUnitEnum.Millimetres
project:SetProperties(properties)
```

第 3 部分是设定几个主要变量：

```
-- Added variable "freq" = 6e9
```

```
freq = project.Variables:Add("freq", "6e9")
-- Added variable "lam" = c0/freq/0.001
lam = project.Variables:Add("lam", "c0/freq/0.001")
-- Added variable "a" = 0.8*lam
a = project.Variables:Add("a", "0.8*lam")
-- Added variable "b" = 0.6*lam
b = project.Variables:Add("b", "0.6*lam")
-- Added variable "c" = 0.2*lam
c = project.Variables:Add("c", "0.2*lam")
```

第 4 部分是创建模型 Cuboid1 和 Cylinder1：

```
-- Created geometry: cuboid "Cuboid1"
properties = cf.Cuboid.GetDefaultProperties()
properties.Depth = "b"
properties.Height = "c"
properties.Label = "Cuboid1"
properties.Width = "a"
Cuboid1 = project.Geometry:AddCuboid(properties)
-- Created geometry: cylinder "Cylinder1"
properties = cf.Cylinder.GetDefaultProperties()
properties.Base.U = "a/2"
properties.Base.V = "b/2"
properties.Height = "2*c"
properties.Label = "Cylinder1"
properties.Radius = "0.2*lam"
Cylinder1 = project.Geometry:AddCylinder(properties)
```

第 5 部分是进行布尔操作：

```
-- Created geometry: union ""
Cuboid1 = project.Geometry["Cuboid1"]
Cylinder1 = project.Geometry["Cylinder1"]
targets = { Cuboid1, Cylinder1 }
project.Geometry:Union(targets)
```

第 6 部分是调整视图：

```
View3D = app.Views["3D view 1"]
View3D:ZoomToExtents()
```

第 7 部分是网格剖分设置：

```
MeshSettings = project.Mesher.Settings
properties = MeshSettings:GetProperties()
properties.Advanced.MinElementSize = 37.0511713132585
properties.Advanced.RefinementFactor = 62.4196350581785
properties.MeshSizeOption = cf.Enums.MeshSizeOptionEnum.Custom
properties.TetrahedronEdgeLength = ""
properties.TriangleEdgeLength = "lam/12"
properties.WireSegmentLength = ""
```

```
MeshSettings:SetProperties(properties)
```

第 8 部分是进行网格划分：

```
-- Mesh the model
project.Mesher:Mesh()
```

上述脚本的运行，也可以直接进入 DOS 界面，把目录切换到../scripts/cadfeko 中，输入如下脚本，按〈Enter〉键即可：

```
>>: cadfeko    --run-script cadfeko_macro_record.lua
```

关于 CADFEKO 中 LUA 脚本的使用方法与详细说明，可以参考 User Manual 中的第 7 章。

2. LUA脚本在POSTFEKO中的使用

POSTFEKO 也支持 LUA 脚本功能，主要是利用 LUA 脚本读取 bof 中的计算结果信息（电场强度、磁场强度、电流、功率、RCS 等），并可对这些结果进行计算处理。

FEKO 运算直接得到参量结果（近场、远场、源、阻抗、S 参数、功率、模式项、T/R 等），可以单击“Home”菜单中的“New script”按钮，选择相应的参数，会直接弹出脚本编辑器，自动生成相应的代码。

下边给出的示例，可以直接复制下边几个部分的脚本到 POSTFEKO 的脚本编辑器，保存该脚本文件，并把光盘目录“../scripts/postfeko”中的“horn.fek”和“horn.bof”复制过来，或直接读取光盘目录“../scripts/postfeko”中的“far_field.lua”文件，直接运行。

示例 1：POSTFEKO 读取远场数据，并在 3D 视图和直角坐标系中显示。

第 1 部分是创建 POSTFEKO 的一个应用 app（pf 代表 POSTFEKO 的一个接口），生成一个工程，并打开“Horn.fek”文件，读取 CADFEKO 求解设置中所设定的远场计算 FarFields：

```
app = pf.GetApplication()
app:NewProject()
app:OpenFile("Horn.fek")
farFieldCollection = app.Models[1].Configurations[1].FarFields
```

第 2 部分添加一个直角坐标系，采用索引和名称两种方式来生成 2D 曲线：

```
-- Add the first far field to a Cartesian graph
graph = app.CartesianGraphs:Add()
farFieldTrace1 = graph.Traces:Add(farFieldCollection[1]) -- Index method
farFieldTrace2 = graph.Traces:Add(farFieldCollection["FarField1"]) -- Name method
```

第 3 部分是显示远场的 3D 视图：

```
-- Add all the far fields in the collection to the 3D view
for index, farFieldData in pairs(farFieldCollection) do
farFieldPlot = app.Views[1].Plots:Add(farFieldData)
end
```

示例 2：POSTFEKO 中通过 LUA 读取近场数据。

该脚本把 z=0，以原点为中心，半径大于等于 0.15m 区域的电/磁场值强制设置为 0：

```
-- Create the near field dataset
nf = pf.NearField.GetDataSet("Horn.StandardConfiguration1.NearField1")
for freq = 1, #nf.Axes[1] do
    for xPos = 1, #nf.Axes[2] do
        for yPos = 1, #nf.Axes[3] do
            for zPos = 1, #nf.Axes[4] do
                if ( math.sqrt(nf.Axes[2][xPos]^2 + nf.Axes[3][yPos]^2) >= 0.15 ) then
          nfPoint = nf[freq][xPos][yPos][zPos];
          nfPoint.EFieldComp1 = 0 + 0*i
          nfPoint.EFieldComp2 = 0 + 0*i
          nfPoint.EFieldComp3 = 0 + 0*i
          nfPoint.HFieldComp1 = 0 + 0*i
          nfPoint.HFieldComp2 = 0 + 0*i
          nfPoint.HFieldComp3 = 0 + 0*i
        end
      end
    end
  end
end
newnf = nf:StoreData(pf.Enums.StoredDataTypeEnum.NearField)
```

上述脚本参见链接资源的文件“../scripts/postfeko/near_field.lua”。要运行该脚本，方法是：单击“Home”菜单中的“Script editor”按钮，启动脚本编辑器，这时复制上述代码，或选择打开“../scripts/postfeko/near_field.lua”，单击“运行”按钮。

示例 3：POSTFEKO 中通过 LUA 设置 2D 曲线的运算。

该脚本演示了如何读取 FEKO 安装路径下的已有工程的结果，显示近场的 2D 曲线，并激活“Enable math”选项，写入表达式实现 2D 曲线翻倍和取 dB，其中 FEKO_HOME 是 FEKO 的环境变量，并可以在脚本编辑器中直接使用。

```
app = pf.GetApplication()
app:NewProject()
app:OpenFile(FEKO_HOME..[[/examples/Resources/Automation/startup.fek]])
cartesianGraph1 = app.CartesianGraphs:Add()
trace1 = cartesianGraph1.Traces:Add(app.Models[1].Configurations[1].NearFields[1])
-- Set 'TraceMathExpression' properties
trace1.Math.Expression = "self*2.0"
trace1.Math.Enabled = true
cartesianGraph2 = app.CartesianGraphs:Add()
trace2 = cartesianGraph2.Traces:Add(app.Models[1].Configurations[1].NearFields[1])
cartesianGraph1:ZoomToExtents()
-- Set 'TraceMathExpression' properties
trace2.Math.Expression = "20*log(self)"
trace2.Label="NearField_Math_Expression_".."20log10E"
trace2.Math.Enabled = true
trace3 = cartesianGraph2.Traces:Add(app.Models[1].Configurations[1].NearFields[1])
-- Set 'Value ScaledToDB'
```

```
trace3.Quantity.ValuesScaledToDB=true
trace3.Label="NearField_dB"
```

关于 POSTFEKO 中 LUA 脚本的使用方法与详细说明，可以参考 User Manual 中的第 10 章。

3. LUA窗体与控件（Form & Controls）

为方便用户创建自定义窗体（Form）以实现某些功能应用，FEKO 集成的 LUA 脚本也提供了窗体与常用控件（Controls）集创建功能，可以通过输入脚本的方式来完成，不提供常用控件的面板功能。对于复杂的窗体，也可以通过 Visual Studio 等工具来创建。

FEKO 提供了控件集主要包括：按钮（formButtons），组合框（formComboBox），复选框（FormCheckBox），单选按钮（FormRadioButtonGroup），文本编辑框（FormLineEdit），选项卡（FormLabel），文件夹浏览（FormDirectoryBrowser），文件浏览（FormFileBrowser），文件另存为（FormFileSaveAsBrowser），控件分组容器（FormGroupBox）等。详细的内容可以参考软件自带的 UserManual.pdf 第 10.3.67～10.3.91 节所列的内容。

在 POSTFEKO 中，打开 Script editor，并把下述代码复制到脚本编辑区域；或直接在脚本编辑器中单击打开按钮，打开“../scripts/controls/form_controls.lua”，单击“Run script”按钮或按〈Ctrl+R〉快捷键运行该脚本，显示如图 4-40 所示的界面（在该脚本中读取链接资源中自带的 Horn.fek 文件和图片文件 horn.png）。

```
-- ================================== --
-- == Loading the model                == --
-- ================================== --
app = pf.GetApplication()
app:NewProject()
app:OpenFile( string.format([[Horn.fek]], FEKO_HOME) )
-- ================================== --
-- == Creating the form items          == --
-- ================================== --
form = pf.Form.New("Demonstration dialog", pf.Enums.FormLayoutEnum.Grid)
grpLeftHalf = pf.FormGroupBox.New("Left half group")
grpRightHalf = pf.FormGroupBox.New("Right half group")
grpTopLeft = pf.FormGroupBox.New("Top left group")
grpBottomLeft = pf.FormGroupBox.New("Bottom left group")
-- Create image for top left corner
image = pf.FormImage.New("horn.png")
width = 300 -- pixels
scalefactor = width/image.Width
image:SetSize( width, image.Height*scalefactor)
grpTopLeft:Add(image)
-- Create items for bottom left corner
checkbox = pf.FormCheckBox.New("Check box")
filebrowser = pf.FormFileBrowser.New("File browser")
label = pf.FormLabel.New("Label")
grpBottomLeft:Add(checkbox)
grpBottomLeft:Add(filebrowser)
```

```
grpBottomLeft:Add(label)
-- Create itmes for right group
options = {} -- Set of options for combo-boxes and radio groups
table.insert( options, "Option 1" )
table.insert( options, "Option 2" )
table.insert( options, "Option 3" )
combobox = pf.FormComboBox.New("Combo box", options)
dataselector=pf.FormDataSelector.New("Nearfieldselector",
pf.Enums.FormDataSelectorType.NearField)
lineedit = pf.FormLineEdit.New("Line edit")    --LineEdit control
radiogroup = pf.FormRadioButtonGroup.New("Radio button group", options) --radiogroup control
spinbox = pf.FormIntegerSpinBox.New("Spin box")     -- spinbox control
grpRightHalf:Add(combobox)
grpRightHalf:Add(dataselector)
grpRightHalf:Add(lineedit)
grpRightHalf:Add(radiogroup)
grpRightHalf:Add(spinbox)
-- Add groups to the dialog
grpLeftHalf:Add(grpTopLeft)
grpLeftHalf:Add(grpBottomLeft)
form:Add(grpLeftHalf, 1, 1)
form:Add(grpRightHalf, 1, 2)
-- Run the dialog
form:SetSize(650, 500)
okPressed=form:Run()
if okPressed then
  print "OK pressed"
else
print "Cancel pressed"
end
```

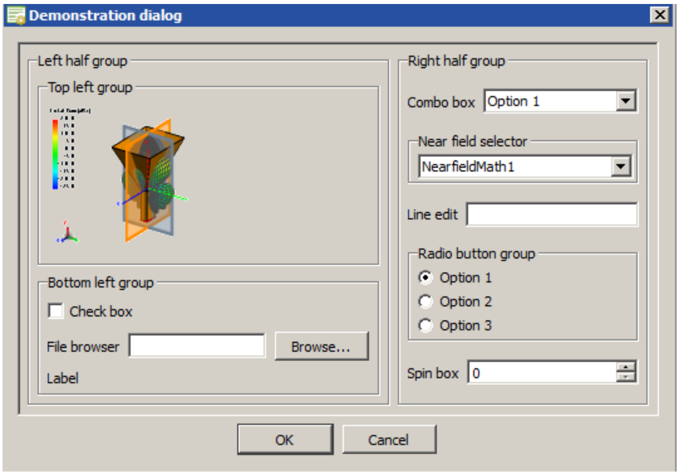


图 4-40　显示的界面

4. 其他主要模块

FEKO 安装完成后，包含大量的 LUA 模块，默认情况下可以直接使用下列模块。

1）math：一个数学类库，包含常用的函数方法，见表 4-15。

2）string：一个字符串处理库。

3）table：一个表数据处理库。

4）os：方便用户访问操作系统环境和文件的类库。

5）io：一个读写文件的输入/输出模块。

6）debug：脚本调试模块。

表 4-15 常用函数

函数名称	函数解释	函数举例	函数结果说明
pi	3.1415926535898		
abs	取绝对值	math.abs(-15)	15
acos	反余弦函数	math.acos(0.5)	1.04719755
asin	反正弦函数	math.asin(0.5)	0.52359877
atan2	x/y 的反正切值	math.atan2(90.0, 45.0)	1.10714871
atan	反正切函数	math.atan(0.5)	0.463647609
ceil	不小于 x 的最大整数	math.ceil(5.8)	6
cosh	双曲线余弦函数	math.cosh(0.5)	1.276259652
cos	余弦函数	math.cos(0.5)	0.87758256
deg	弧度转角度	math.deg(math.pi)	180
exp	计算以 e 为底 x 次方值	math.exp(2)	2.718281828
floor	不大于 x 的最大整数	math.floor(5.6)	5
fmod(mod)	取模运算	math.mod(14, 5)	4
frexp	把双精度数val分解为数字部分（尾数）和以 2 为底的指数n，即val=$x\times2^n$	math.frexp(10.0)	0.625 4
ldexp	计算value$\times2^n$	math.ldexp(10.0, 3)	$80=10\times2^3$
log10	计算以 10 为基数的对数	$math.log_{10}(100)$	2
log	计算一个数字的自然对数	math.log(2.71)	0.9969
max	取得参数中最大值	math.max(2.71, 100, -98, 23)	100
min	取得参数中最小值	math.min(2.71, 100, -98, 23)	-98
modf	把数分为整数和小数	math.modf(15.98)	15 98
pow	得到 x 的 y 次方	math.pow(2, 5)	32
rad	角度转弧度	math.rad(180)	3.14159265358
random	获取随机数	math.random(1, 100)或math.random(100)	取 1～100 的随机数
randomseed	设置随机数种子	math.randomseed(os.time())	在使用 math.random 函数之前必须使用此函数设置随机数种子
sinh	双曲线正弦函数	math.sinh(0.5)	0.5
sin	正弦函数	math.sin(math.rad(30))	0.5210953
sqrt	开平方函数	math.sqrt(16)	4
tanh	双曲线正切函数	math.tanh(0.5)	0.46211715
tan	正切函数	math.tan(0.5)	0.5463024

FEKO 安装完后，有些广泛应用的 LUA 模块（也包括网上下载得到的模块）在默认情况下会包含进来，如果要应用这些模块，则必须使用函数 require()进行加载，例如，require('luacom')。下面介绍的几个模块均为 FEKO 安装自带的模块，应用时必须重新进行加载。

1）luacom：在 Windows 系统中安装完 FEKO 后，会包含“luacom”模块，该模块是一个非常强大的模块，它使用户可以使用各种 com 组件，如 Office 的 Word、Excel 等。下述示例说明了如何使用该模块来控制 Excel。

```
-- COM example 1
require('luacom')
excel = luacom.CreateObject("Excel.Application")
excel.Visible = true
wb = excel.Workbooks:Add()
ws = wb.Worksheets(1)
for i=1, 20 do
ws.Cells(i,1).Value2 = i
end
-- COM example 2
require "luacom"
excel = luacom.CreateObject("Excel.Application")
local book = excel.Workbooks:Add()
local sheet = book.Worksheets(1)
excel.Visible = true
for row=1, 30 do
sheet.Cells(row, 1).Value2 = math.floor(math.random() * 100)
end
local chart = excel.Charts:Add()
chart.ChartType = 4
local range = sheet:Range("A1:A30")
chart:SetSourceData(range)
```

2）LuaFileSystem：该模块提供便携的方式访问底层的目录结构和文件属性。模块名称必须包括“lfs”。

3）LuaXml：一个处理 XML 数据的精简函数集，必须采用名称“luaxml”来调用该模块。

4）PenLight：LUA 的扩展模块，一个包含表、数组、字符串、路径和目录、数据和函数的集合，必须采用名称“pl”来调用该模块。

5）winapi：该模块是视窗操作系统应用程序接口，提供了一些基本的工具，用于 Windows 系统，如访问注册表、找出系统资源，并让用户更多地控制进程的创建。

FEKO 的 LUA 脚本也提供了特殊的功能函数集，这里列出一部分：

1）Complex——复数运算函数集。

2）Matrix——矩阵运算函数集。

3）ComplexMatrix——快速矩阵复数运算。

下述脚本演示了矩阵的复数运算，参见链接资源“../scripts/math/matrix_complex.lua”。为了保证该脚本在 CADFEKO 和 POSTFEKO 中都可以直接运行，而不用修改代码，这里加入了

一行特殊的命令——“feko=cf or pf”。

```
-- Create a default 2×2 complex matrix of zeros
feko= cf or pf
cm1 = feko.ComplexMatrix.Zeros(2)
-- Assign values to each element of the matrix
cm1[1][1] = 1 + j
cm1[2][1] = 2 + 2*j
cm1[1][2] = 3 + 3*j
cm1[2][2] = 4 + 4*j
-- Create a 2×2 complex matrix with a fill value of  2 + j
cm2 = feko.ComplexMatrix(2, 2, 2 + j)
-- Determine the transpose and determinant of the matrix
transpose = cm1:Transpose()
determinant = cm1:Determinant()
-- Some of the valid operators for 'ComplexMatrix'
cm3 = cm1 * 2
cm4 = cm2 * (3 + j)
cm5 = cm1 + 2
cm6 = cm1 - 1
cm7 = cm1 + cm2
cm8 = cm1 - cm2
```

本部分的内容主要针对 LUA 脚本的初学者，通过本节的学习，能够快速掌握 FEKO 的 LUA 脚本的使用以及最基本的函数和结果处理功能，为以后灵活应用 LUA 脚本解决工作中的任意功能需求打下坚实的基础。

第 5 章



工程仿真案例 1——常用工程天线

本章主要介绍 FEKO 软件在工程仿真中的天线应用实例。工程中常见的天线包括线天线、喇叭天线、反射面天线、微带天线以及各种阵列天线等。根据各类天线的结构及馈电特点，在 FEKO 软件中需要选择不同的馈电端口。FEKO 软件支持的馈电端口包括：线端口（Wire port）、棱边端口（Edge port）、波导端口（Waveguide port）、有限元端口（FEM line port，FEM modal port）等。本章将详细介绍 FEKO 在各类常见工程天线仿真中的具体操作和流程。

5.1　半波振子天线
5.2　矩形波导天线
5.3　低频线圈天线
5.4　圆波导圆极化天线
5.5　偏馈反射面天线
5.6　微带天线
5.7　介质谐振天线（DRA）
5.8　波导缝隙天线
5.9　相控阵天线
5.10　汽车车窗天线

5.1 半波振子天线

5.1.1 振子天线设计背景与原理

半波偶极子天线一般由两根直径和长度都相等的直导线组成，每根直导线长度为四分之一工作波长，总长度为半个波长。在偶极子天线中，导线直径要远小于工作波长，天线的激励一般从中间馈入，为等幅反向加在两根直导线相邻端点上，且两直导线相邻端点的距离远小于工作波长，可以忽略不计。偶极子天线从中心馈电，两端开路，故中间处电流最大，两端电流为零，其电流分布可近似为余弦分布。由于半波偶极子天线的这种结构使得其工作时，沿天线方向辐射基本为零，垂直于天线方向辐射最大，尤其是靠近中心的位置。

对于实际的线天线仿真，当天线实际半径可以忽略不计时（FEKO 中要求剖分之后的线单元长度至少是线单元半径的 4 倍），采用 FEKO 的线模型是处理该类问题非常有效的方法，因为它可以极大地降低计算复杂度。但当线天线的半径不能忽略时，就需要考虑采用三角形面单元。在下面给出的偶极子线天线仿真应用中，分别介绍 FEKO 采用线模型定义线端口（Wire port）和体模型（圆柱体）定义棱边端口（Edge port）两种端口激励模式。下面分别就这两种情况进行设计分析。

5.1.2 半波振子天线的仿真实现

本例将仿真分析一个半波偶极子天线，首先采用线模型仿真，其次介绍圆柱模型的仿真，最后介绍对称性的应用，主要涉及建模、求解设置、网格剖分、数据后处理等内容。

FEKO 中建立的偶极子天线线模型如图 5-1 所示，仿真分析频率为 300MHz 的半波偶极子天线。

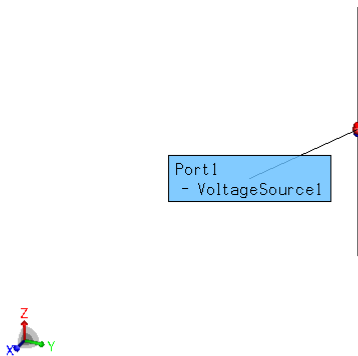


图 5-1　FEKO 中采用线模型创建的偶极子天线

1．线模型仿真流程

（1）新建工程

打开 CADFEKO，在窗口中选择“Create a new model”，新建并保存新工程为“dipole_

wireport.cfx”。

（2）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中可以设定长度的单位，在该例中选择默认的单位“Metres(m)”，如图 5-2 所示。

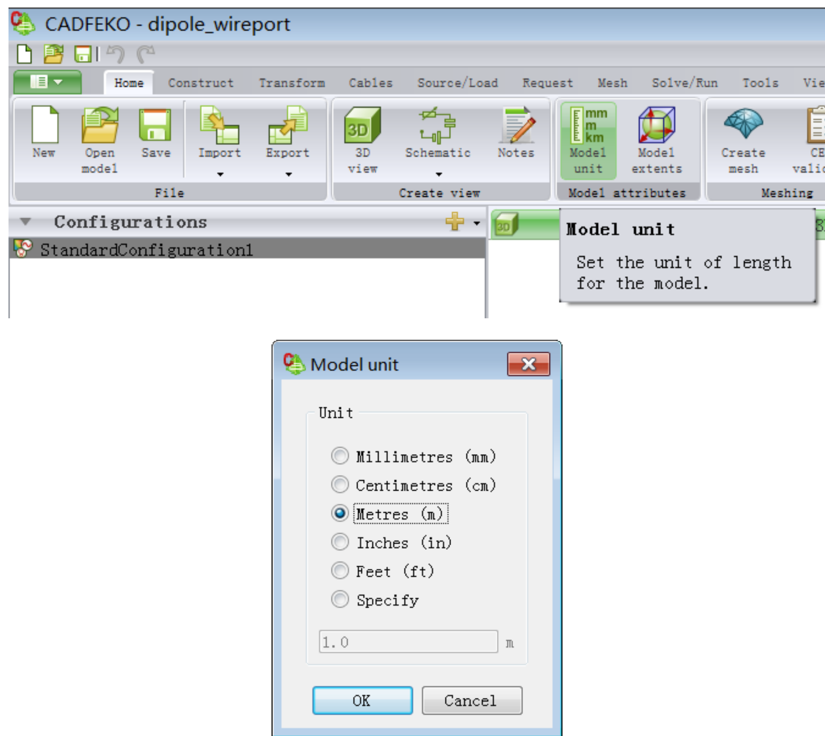


图 5-2　长度单位设置为 m

（3）定义变量

在 CADFEKO 左侧的树形浏览器中展开“Variables”结点，依次定义如下变量，如图 5-3 所示。

工作频率：freq=300e6。

工作波长：lam = c0/freq。

线网格剖长度：segl=lam/15。

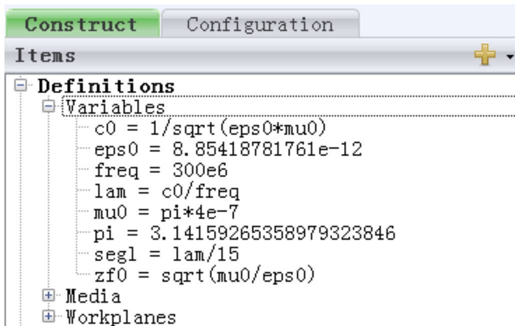


图 5-3　变量定义

（4）模型建立

单击“Construct”菜单中的“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，在“Geometry”选项卡中设置：

Start point: (U: 0.0; V:0.0; N: −lam/4)。

End point: (U: 0.0; V:0.0; N: lam/4)。

Label：dipole。

然后单击“Create”按钮，如图 5-4 所示。

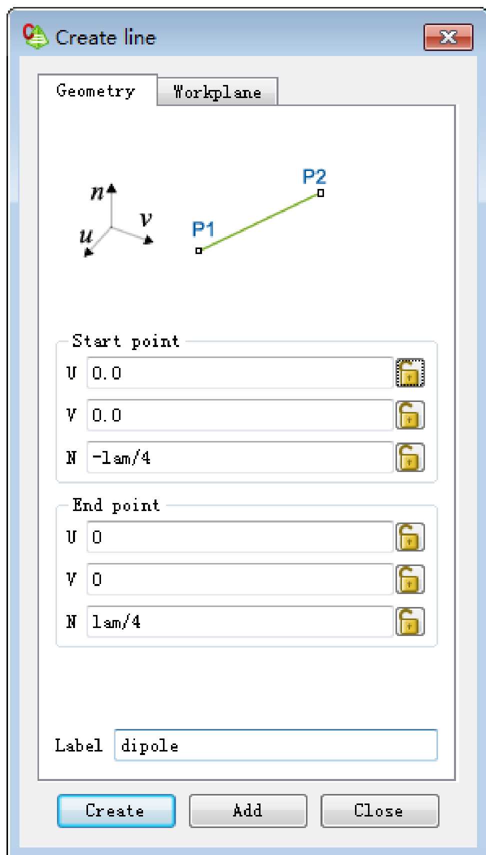


图 5-4　定义半波偶极子天线

此时在左边的树形浏览器中，展开“Model”下的“Geometry”结点，存在新建立的 dipole 模型，单击“view”→“Zoom to extents”，便可在 3D 视图（即 3D view1）中适中显示建立的模型。

（5）创建端口

首先选择左边树形浏览器中“Model”→“Gemetry”中创建的模型 dipole，再在左下角的“Details”树形浏览器中展开“Wires”结点，选中“Wire1”并单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，如图 5-5 所示，弹出如图 5-6 所示的“Create wire port (geometry)”对话框，设置“Location on wire”为“Middle”。然后单击“Create”按钮。

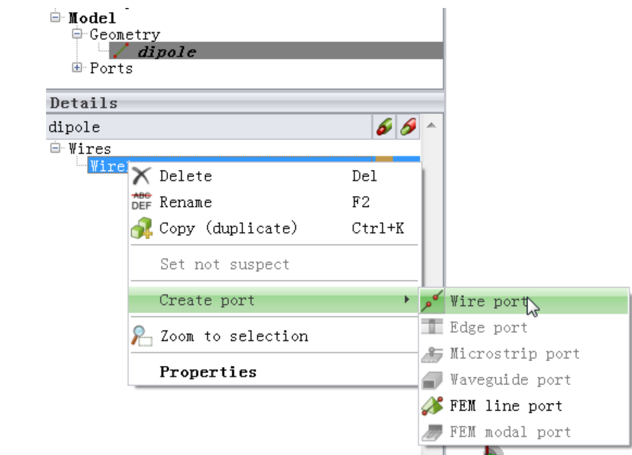


图 5-5 创建 Wire port

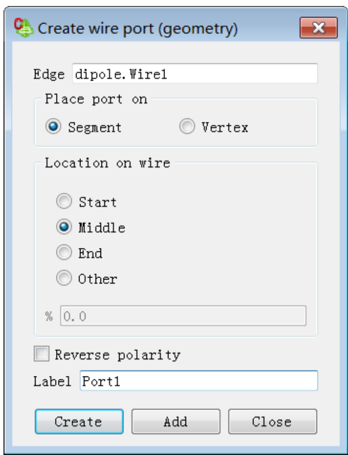


图 5-6 Wire port 设置

（6）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”选项卡切换到“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，选择“Single frequency”，在“Frequency (Hz)”中输入定义好的变量“freq”，单击“OK”按钮。

（7）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，如图 5-7 所示。选择“Port1”选项，默认电压源的幅度为 1V，相位为 0deg。注意，“Port impedance”为 50Ohm，此选项只是计算端口的反射系数时的参考阻抗，该设置不会影响天线端口的实际阻抗值。

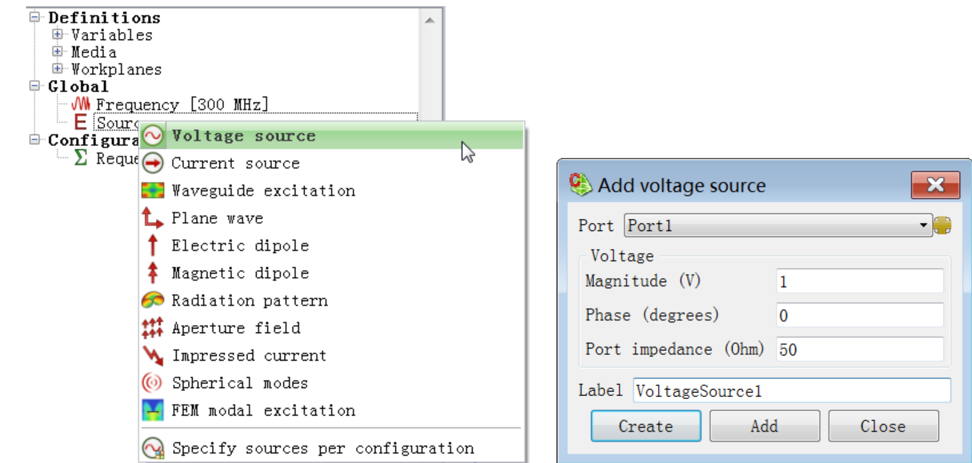


图 5-7 添加激励

（8）求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Far

fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，如图 5-8 所示。单击“3D Pattern”按钮，修改 theta 的 Increment 为 2.0、Phi 的 Increment 为 2.0。设置 Label 为 ff3D。然后单击“Add”按钮。

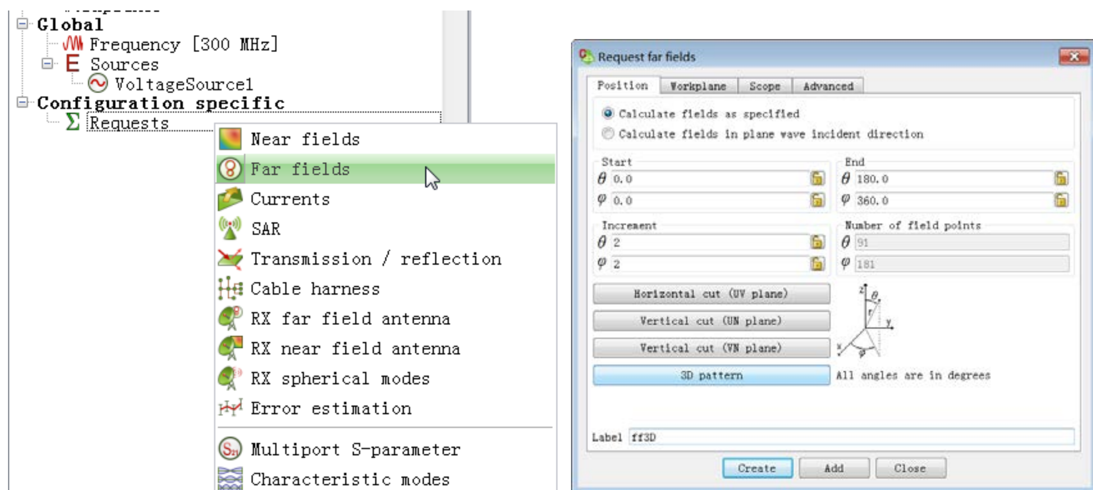


图 5-8　设置 3D 远场方向图

添加水平面方向图计算，在图 5-8 中单击“Vertical cut (UN plane)”按钮，设置 theta 的 Increment 为 2、Phi 的 Increment 为 0，设置 Label 为 ffXOZ。然后单击“Create”按钮。

（9）网格划分

在“Mesh”菜单中单击“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，进行如下设置。

设置“Mesh size”为“Fine”，也可选择“Custom”选项；设置线单元尺寸“Wire segment length”为“segl”；设置“wire segment radius”为“lam/100”。最后单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-9 所示。

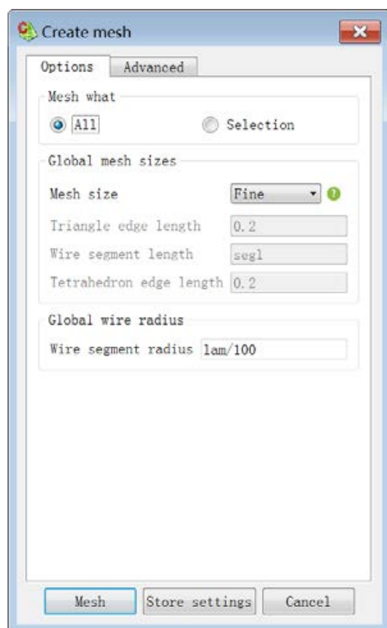


图 5-9　网格设置及剖分

（10）提交计算

计算方法采用默认的矩量法“MoM”。

在“Solve/Run”菜单中单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。也可以选择并行模式，详见第 4 章。

（11）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

（12）显示 3D 结果

在“Home”菜单中，单击“Far field”→“ff3D”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。进入“Result”菜单，单击“Grid”按钮关闭网格。这时，得到的 3D 显示效果如图 5-10 所示。

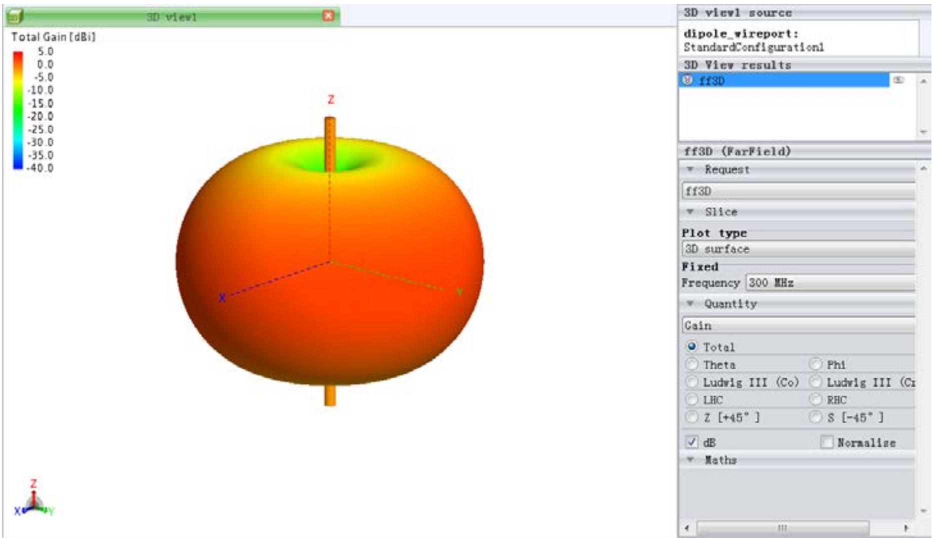


图 5-10　半波偶极子天线三维方向图

（13）显示 2D 结果

切换到“Home”菜单，在“Create new display”中单击“Polar”，进入极坐标系“Polar graph1”，单击“Far field”→“ffXOZ”，会在极坐标系中直接显示 Phi=0° 极化平面上的 2D 增益方向图，如图 5-11 所示。在右侧控制面板的 Traces 区域，自动生成 ffXOZ，选中 Trace：ffXOZ，在控制面板中进行设置，勾选“dB”复选框。

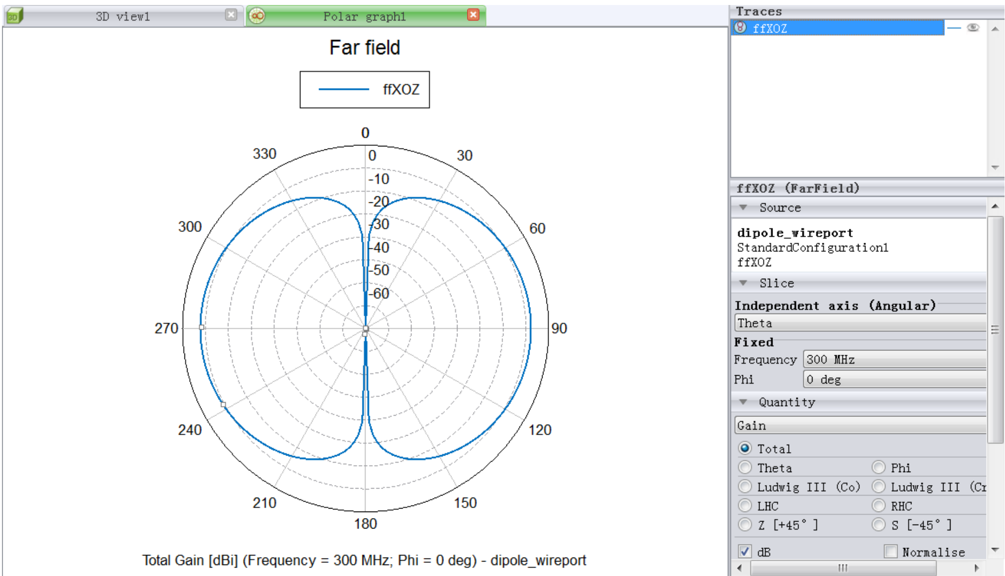


图 5-11　半波偶极子天线二维切面增益方向图

将鼠标光标放置到 2D 图的轴向标尺上，单击鼠标右键，选择“Axis settings”选项，在弹出的对话框中选择“Radial”选项卡，取消勾选“Automatically determine the grid ranges”复选框，设置“Minimum Value”为“−10”、“Maximum value”为“4”，如图 5-12 所示。可

对 2D 图中的轴向标尺进行调整。

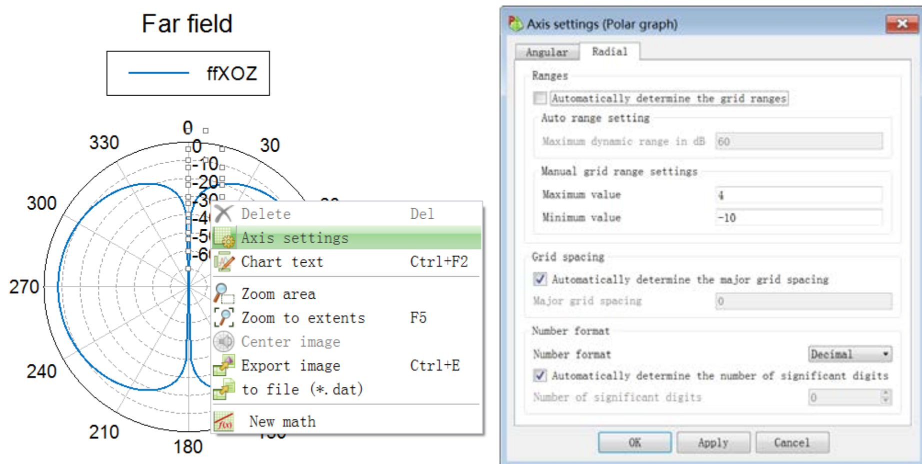


图 5-12 2D 视图中标尺的调整

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“dipole_wireport.pfs”，关闭 POSTFEKO。

2．体模型仿真流程

真实的偶极子天线是有一定半径的，当天线的半径不能忽略时（FEKO 中要求剖分后的线单元长度至少是线单元半径的 4 倍），需要采用体模型来模拟线结构，此时需要采用棱边激励端口。

打开刚才新建的工程“dipole_wireport.cfx”，单击左上角起始菜单中的“Save as”按钮，将其另存为“surf_dipole.cfx”。

（1）添加变量

添加变量 radius = 0.01；tri=min(lam/10,radius/3)。

（2）创建模型

在左侧的树形浏览器中，在“Geometry”下选择“dipole”，按〈Delete〉键，或右键选择“delete”选项。单击“Construct”菜单中的“Cylinder”按钮，弹出“Create cylinder”对话框，如图 5-13 所示。在“Geometry”选项卡中进行如下设置。

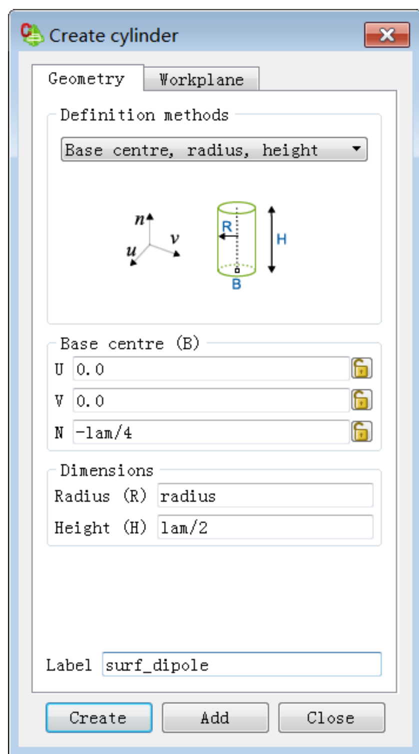


图 5-13 体模型偶极子创建

Base centre: (U: 0,0; V:0,0; N: −lam/4)。

Radius (R): radius。

Height：lam/2。

Label: surf_dipole。

然后单击“Create”按钮。

为了创建棱边段，需要在创建的圆柱的中心位置创建棱边 edge。单击“Construct”菜

单，“ellipse”按钮，弹出“Create ellipse”对话框，在“Geometry”选项卡中按照图 5-14 所示进行设置，创建圆环。

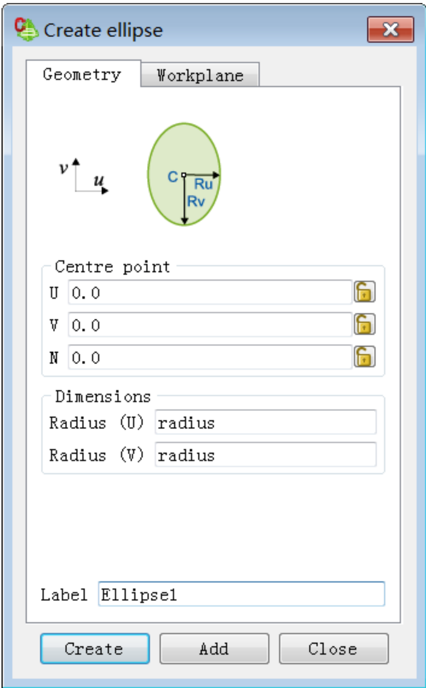


图 5-14　创建圆环

在左侧的树形浏览器中的“Geometry”结点下，同时选中“Ellipse1”和“surf_dipole”并单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，对两个模型进行合并，如图 5-15 所示。选择合并后的模型“Union1”并单击鼠标右键选择“Rename”选项，将名称修改为“surf_dipole”。

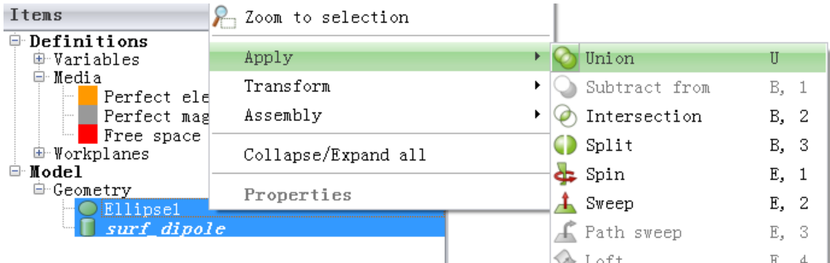


图 5-15　合并两个模型

模型合并后将在“surf_dipole”中间生成“Edge”，同时会在模型中央生成一个多余的圆面，可以删除这个圆面进行简化。选择“Display options”→“Geometry”，只勾选“Faces”复选框，方便下一步在图中选择要删除的圆面。单击“Cutplanes”按钮，选择“Global ZX”，勾选“Active”复选框，如图 5-16 所示。可通过“Flip”调整在 3D 视图中显示哪一部分。

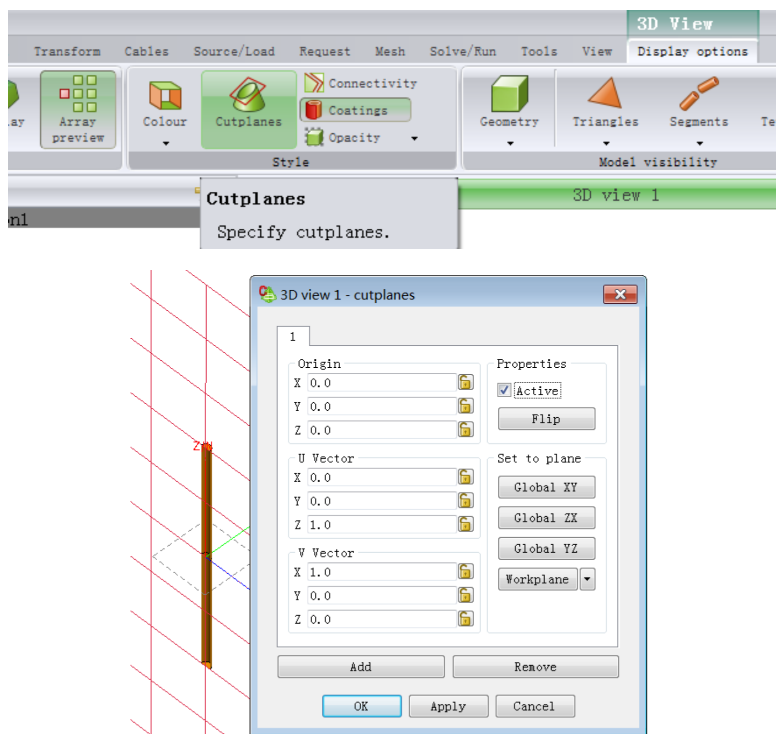


图 5-16　单击“Cutplanes”按钮在视图上把模型切开

修改鼠标的选择方式为选择面，单击圆柱中央的圆面并删除，如图 5-17 所示，重新选择“Display options”→“Cutplanes”，取消勾选“Active”复选框。

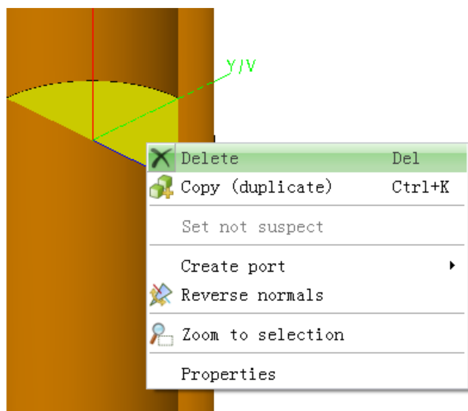


图 5-17　删除中央的圆面

（3）创建 Edge port

选择“Display options”→“Geometry”，重新勾选“Edges”，如图 5-18 所示，选择圆柱中央的 Edge，单击鼠标右键，选择“Create Port”→“Edge port”，在弹出的“Create edge port（geometry）”对话框中的“Positive faces”列表框中选择任意一个面（黄色显示），单击“Move to negative faces”按钮。单击“Create”按钮关闭对话框。

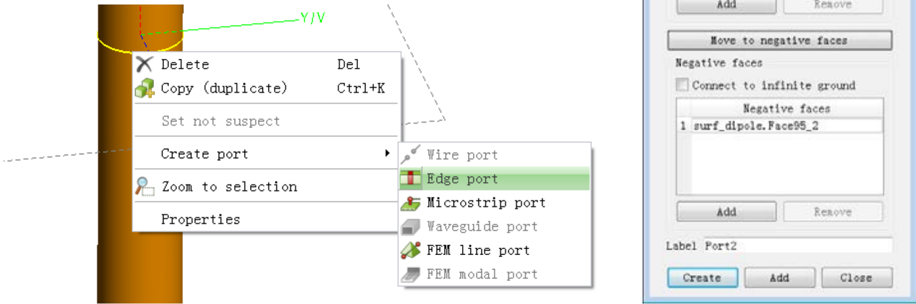


图 5-18 创建 Edge port

（4）激励设置

左边的树形对话框中切换到“Configuration”，在“Global”中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，选择“Port1”，默认电压源的幅度为 1V，相位为 0deg。注意，“Port impedance”为 50Ohm，此选项只是计算端口的反射系数时的参考阻抗，该设置不会影响天线端口阻抗的计算。

（5）网格剖分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置网格剖分方法“Mesh size”为“Standard”。切换到“Advanced”选项卡，调整“Refinement factor”参数，如图 5-19 所示。单击“Mesh”按钮生成网格。

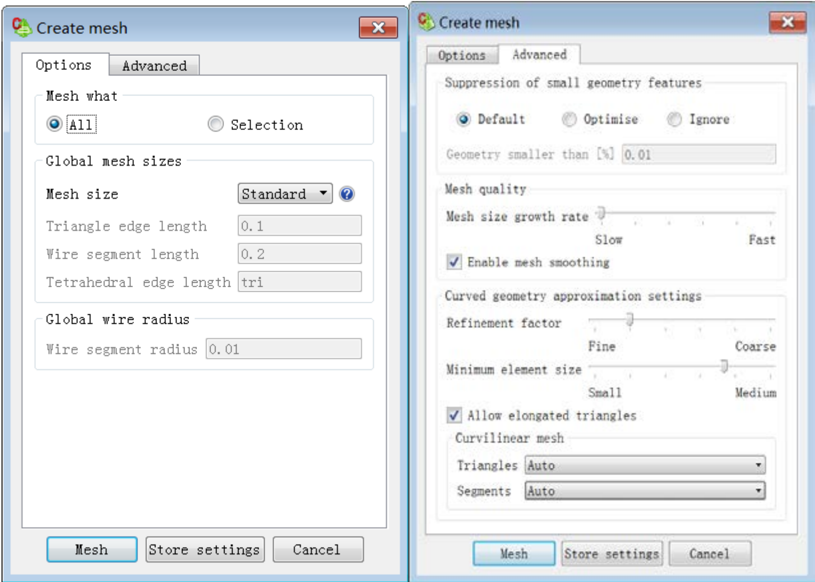


图 5-19 创建网格

（6）提交计算

计算方法采用默认的矩量法“MoM”。

在“Solve/Run”菜单中，单击“FEKO Solver”按钮，或单击右上角的 FEKO 计算图标提交计算。

（7）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或右上角的 POSTFEKO 按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

在“Home”菜单中，在“Create new display”中单击“Polar”，进入极坐标系“Polar Graph1”，单击“Far field”→“ffXOZ”，会在极坐标系中直接显示 Phi=0°极化平面上的 2D 增益方向图，在右侧控制面板的 Traces 区域，自动生成 ffXOZ，选中 Trace：ffXOZ，在控制面板中进行设置，勾选“dB”复选框。

在“Home”菜单中单击“Add model”，选择硬盘中保存的“dipole_wireport.fek”。在 2D 窗口“Polar graph1”中，单击“Far field”，选择“dipole_wireport”工程对应的计算结果“ffXOZ”。同样，将此条曲线也设置为“dB”显示。这样在图形中同时显示了采用 Wire port 及 Edge port 的计算结果。选择“Traces”中的“ffXOZ_1”，单击菜单栏中的“Format”→“Marker style”，为某条曲线增加 Marker 图标，如图 5-20 显示。

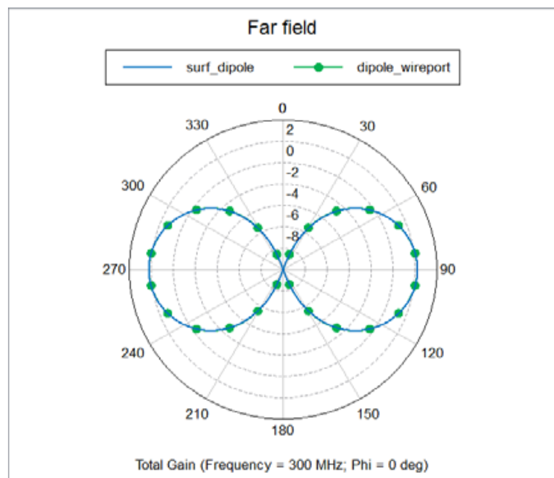


图 5-20　Wire port 与 Edge port 计算的增益曲线对比

（8）应用对称性

FEKO 中有 3 种对称性设置：几何对称（Geometric symmetry）、电对称（Electric symmetry）、磁对称（Magnetic symmetry）。图 5-21 和图 5-22 所示是电对称和磁对称的说明。

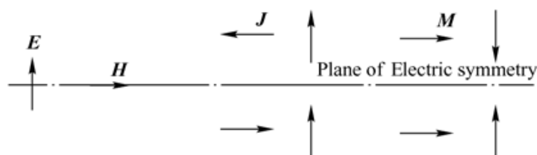


图 5-21　电对称

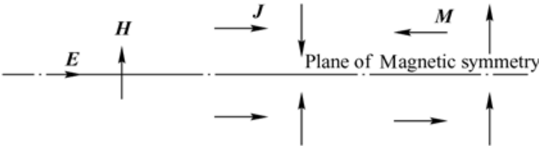


图 5-22 磁对称

打开刚才新建的工程“surf_dipole.cfx”，单击左上角起始菜单中的“Save as”按钮，将其另存为“surf_dipole_sy.cfx”。

在“Solve/Run”菜单中单击“Symmetry”按钮，在图 5-23 所示的界面中选择几何对称面、磁对称面、电对称面。

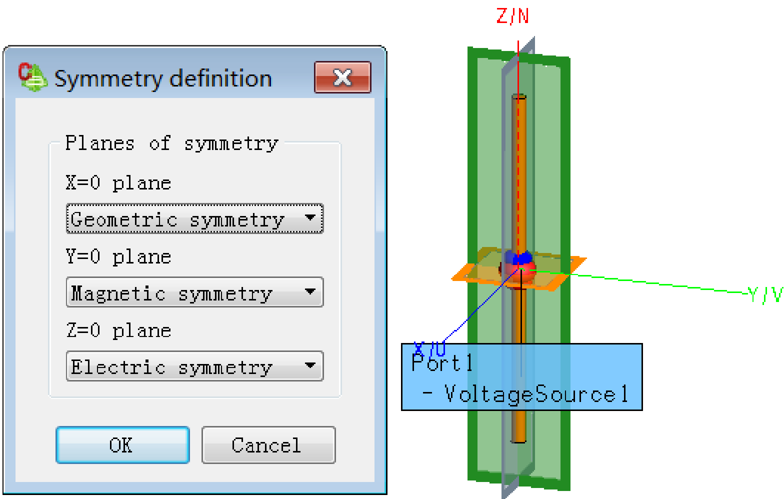


图 5-23 对称面设置

设定对称性后，需要重新剖分网格。在菜单栏中单击“Mesh”→“Create mesh”，采用默认设置，单击“Mesh”按钮，重新剖分网格。

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，或单击右上角的 FEKO 计算图标提交计算。

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或右上角的 POSTFEKO 按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

进入“Home”菜单，在“Create new display”中单击“Polar”，进入极坐标系“Polar graph1”，单击“Far field”→“ffXOZ”，会在极坐标系中直接显示 Phi=0° 极化平面上的 2D 增益方向图，在右侧控制面板的 Traces 区域，自动生成 ffXOZ，选中 Trace：ffXOZ，在控制面板中进行设置，勾选“dB“复选框。在 2D 图中选中轴向坐标，单击鼠标右键，选择“Axis setting”选项，修改“Maximum dynamic range in dB”为 10，单击“OK”按钮。

在“Home”菜单中单击“Add model”，选择硬盘中保存的“surf_dipole.fek”。在 2D 窗口“Polar graph1”中，单击“Far field”，选择“surf_dipole”工程对应的计算结果“ffXOZ”。同样，将此条曲线也设置为“dB”显示。这样在图形中同时显示了采用 Edge port 及 Edge port+对称性的计算结果。选择“Traces”中的“ffXOZ_1”，单击菜单栏中的“Format”→“Marker style”，为“surf_dipole”曲线增加 Marker 图标，如图 5-24 显示。

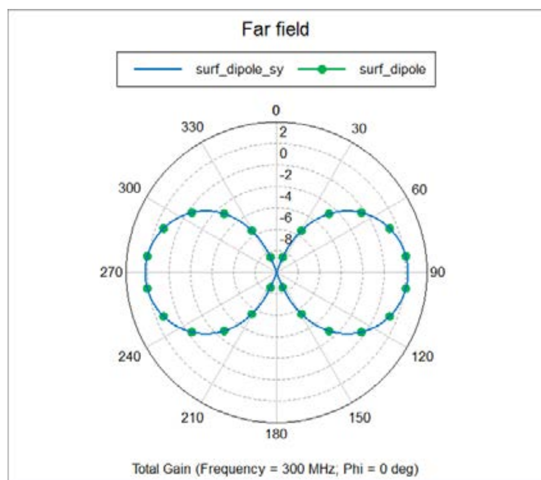


图 5-24 Edge port + 对称性与 Edge port 计算的增益曲线对比

5.2 矩形波导天线

波导是微波传输领域最重要的传输媒介之一，开口的波导可以称为波导天线。最常见的波导天线是矩形喇叭或圆形喇叭等，广泛用作馈源及标准测试天线。本案例将介绍 FEKO 仿真中 Waveguide Port 的设置和应用。

波导圆极化天线的全模型示意图如图 5-25 所示。下面介绍在 FEKO 软件中的仿真实现。

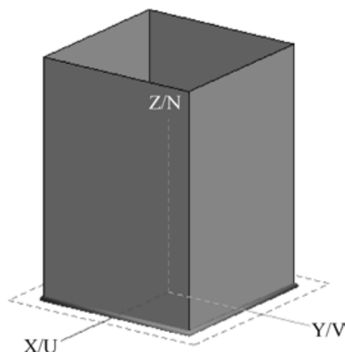


图 5-25 波导圆极化天线的全模型示意图（方波导）

计算方法描述：采用矩量法——MoM。

计算参数：计算该类天线的左旋、右旋辐射方向图。

启动 CADFEKO，新建一个工程“square_waveguide_LHC.cfx”。

定义长度单位：默认为 m。

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Millimetres(mm)”单选按钮，如图 5-26 所示。

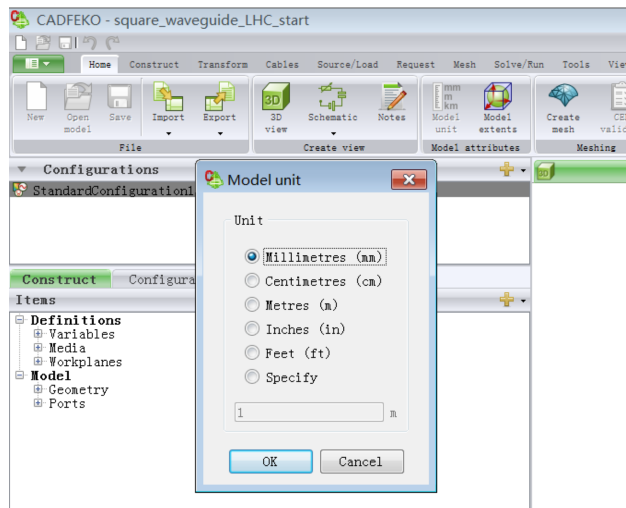


图 5-26　设置长度单位为 mm

定义变量：在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量：

1）工作频率：freq=2.8e9。

2）长度缩放系数：sf =0.001。

3）工作波长：lam = c0/freq/sf。

4）波导宽度：wg_a=70。

5）波导长度：wg_h=100，如图 5-27 所示。

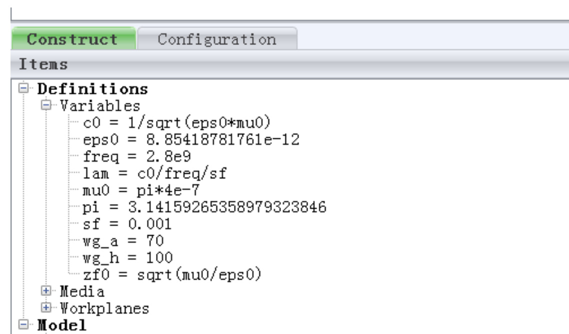


图 5-27　变量定义

模型建立：方波导天线模型建立。单击“Construct”菜单中的“Cuboid”，弹出“Create cuboid”对话框，如图 5-28 所示。在“Geometry”选项卡中进行如下设置。

Base corner: (U: −wg_a/2; V: −wg_a/2; N: 0.0)。

Width(W)：wg_a。

Depth(D)：wg_a。

Height(H)：wg_h。

Label：square_wg。

最后单击“Create”按钮。

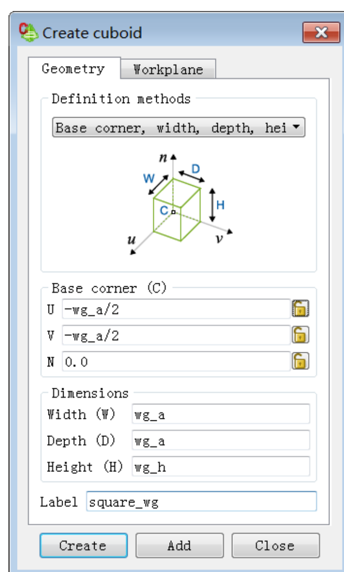


图 5-28　定义方波导天线

在 3D 视图中，选中新建模型 square_wg 的顶部面元（即 z=wg_h 的面），单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除该面元，如图 5-29 所示。

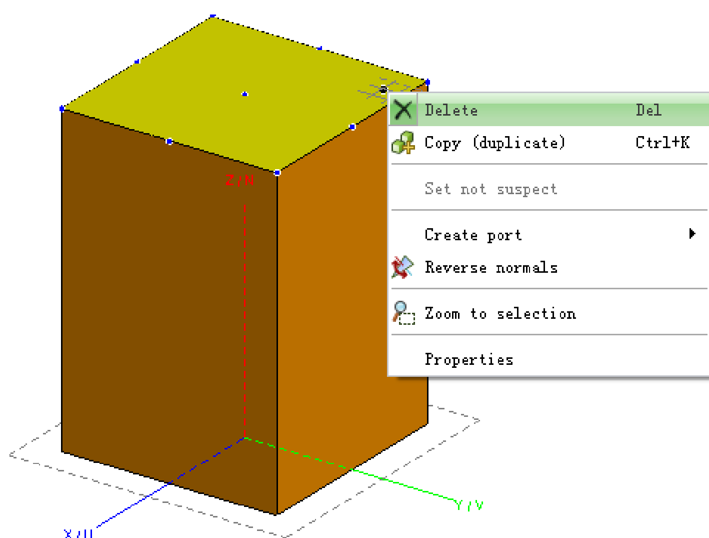


图 5-29　删除顶部面元

在 3D 视图区域，进入面选模式，选中新建喇叭天线“square_wg”的最底部面元（即 z=0 的面元），单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，如图 5-30 所示。

选择“Meshing”选项卡，勾选“Local mesh size”复选框，设置“Mesh size”为“lam/15”，单击“OK”按钮。

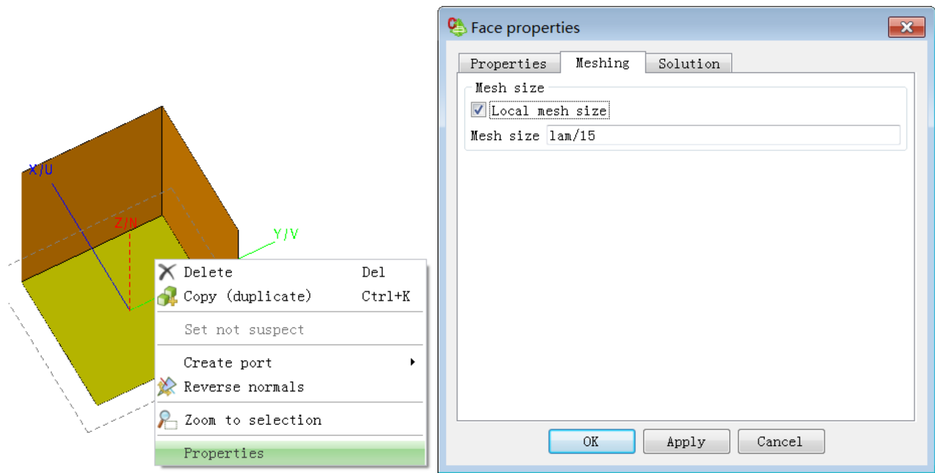


图 5-30　波导端口局部网格剖分定义

设定波导端口：在 3D 视图区域，把模型移动并缩放到适合的角度，单击鼠标左键自动切换到面选模式，选中新建的方波导天线底部面元（即 z=0 的面元），单击鼠标右键，选择“Create port”→“Waveguide port”选项，如图 5-31 所示，此时弹出“Create waveguide port (geometry)”对话框，如图 5-32 所示。

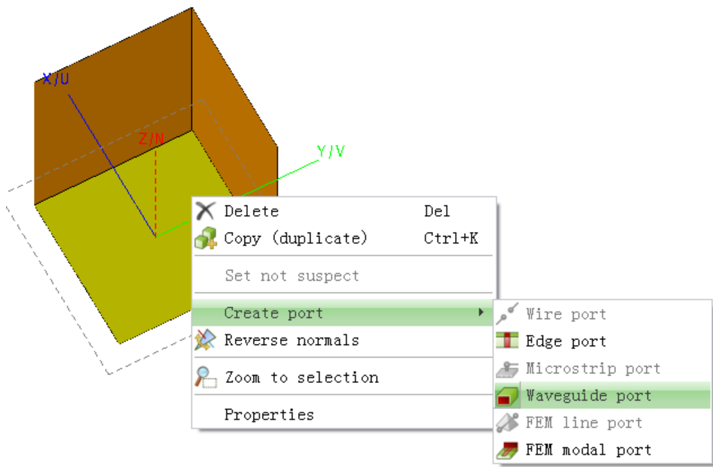


图 5-31　定义波导端口 1

勾选“Propagation direction opposite to normal”复选框，目的是使该面添加的波导信号向里传播，即红色箭头朝里。在“Label”文本框中输入“Port1”，单击“Create”按钮。

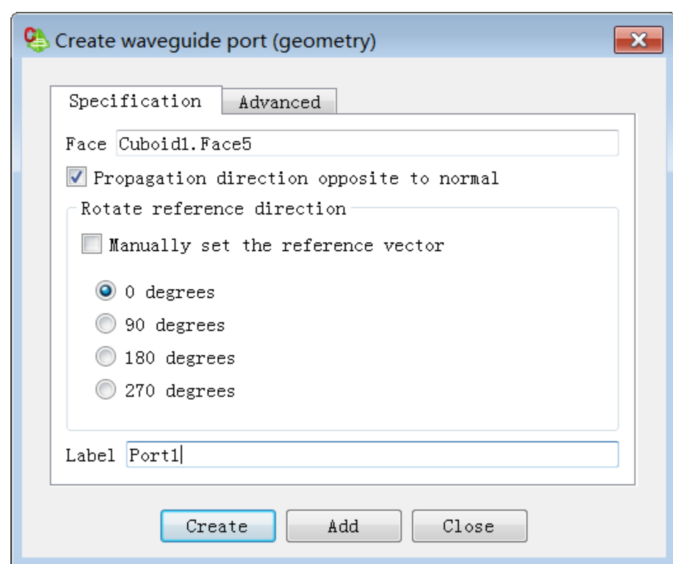


图 5-32　定义波导端口 2

电参数设置：在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，选择“Single frequency”，设置“Frequency (Hz)”为“freq”，单击“OK”按钮。

激励设置：在“Global”结点中，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Waveguide source”选项，弹出“Add waveguide source”对话框，如图 5-33 所示。选中“Specify modes manually”单选按钮。单击中部的“Add”按钮。

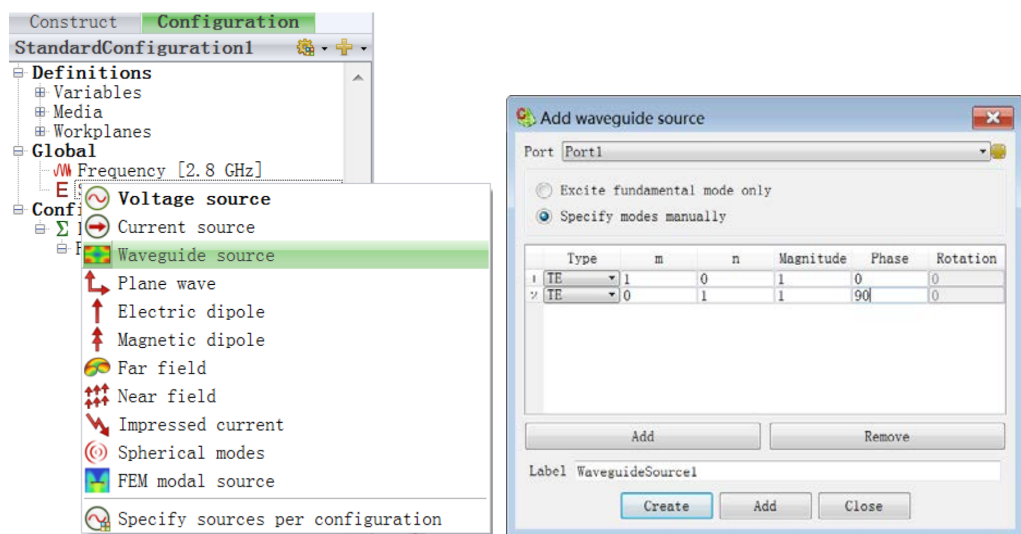


图 5-33　定义端口激励

按照表 5-1 中的值进行设置。

表 5-1　参数设置

序号	Type	m	n	Magnitude	Phase
1	TE	1	0	1	0
2	TE	0	1	1	90

在“Label”文本框中输入“WaveguideSource1”，单击“Create”按钮。

求解设置：在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，如图 5-34 所示。单击“3D pattern”按钮，修改 theta 的“Increment”为 2，Phi 的“Increment”为 5.0，在“Label”文本框中输入“ff3D”。单击“Add”按钮。

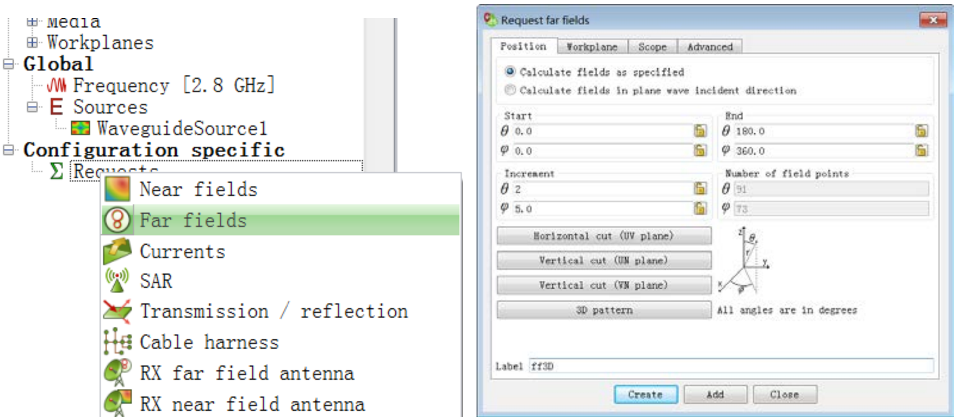


图 5-34　远场方向图求解设（3D pattern）

单击“Vertical cut (UN plane)”按钮，设置 theta 的“Increment”为 2，Phi 的“Increment”为 0，在“Label”文本框中输入“ffXOZ”，单击“Create”按钮，如图 5-35 所示。

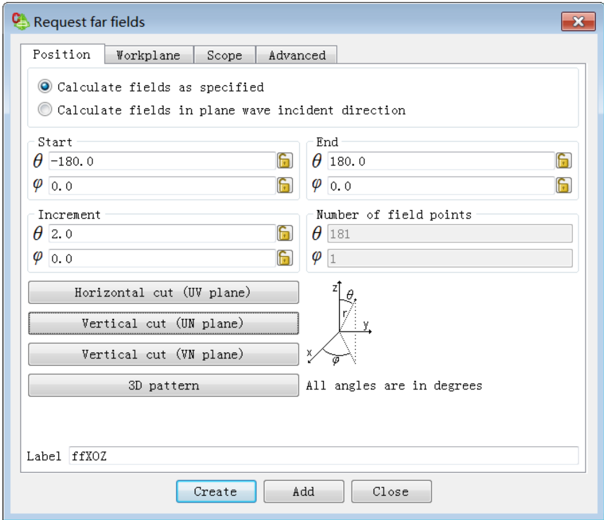


图 5-35　远场方向图求解设置（Vertical cut (UN plane)）

单击“Vertical cut (VN plane)”按钮，设置 theta 的“Increment”为“2”，Phi 的“Increment”为“0.0”，在“Label”文本框中输入“ffYOZ”，单击“Create”按钮，如图 5-36 所示。

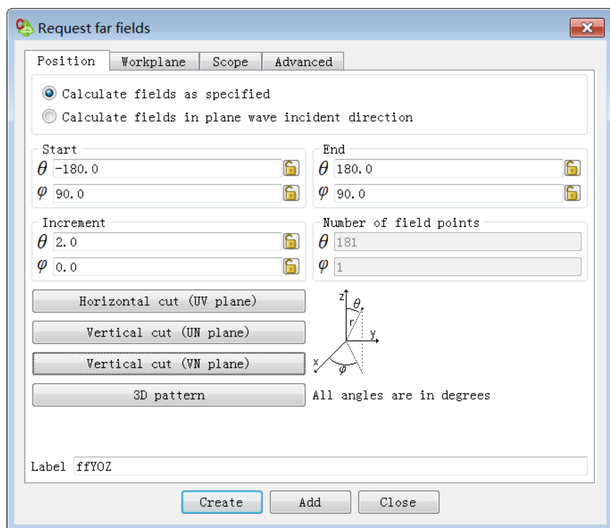


图 5-36　远场方向图求解设置（Vertical cut (VN plane)）

网格划分：单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，如图 5-37 所示，设置网格剖分方法“Mesh size”为“Custom”，三角形单元尺寸“Triangles edge length”为“lam/8”，单击“Mesh”按钮生成网格。

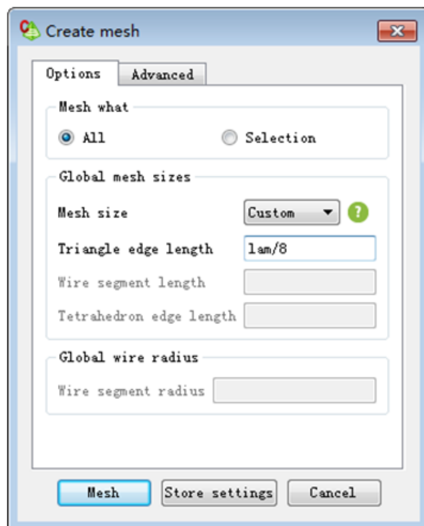


图 5-37　定义网格划分

提交计算：计算方法采用默认的矩量法“MoM”。

进入菜单“Solve/Run”，单击“FEKO Solver”，提交计算。可以选择并行模式。

后处理显示结果：计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按

〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中，单击“Far field”→“ff3D”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框，选中“RHC”单选按钮。

进入“Mesh”菜单，单击“Mesh Opacity”下拉菜单，选择“40%”。这时，得到的 3D 显示效果如图 5-38 所示。

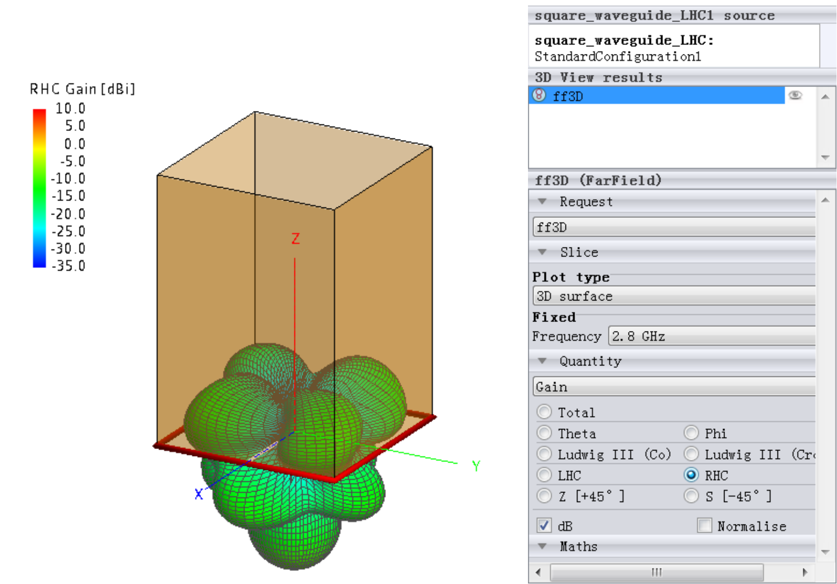


图 5-38　3D 辐射方向图显示（右旋圆极化）

然后在右侧控制面板中勾选“dB”复选框，选中“LHC”单选按钮。这时，得到的 3D 显示效果如图 5-39 所示。

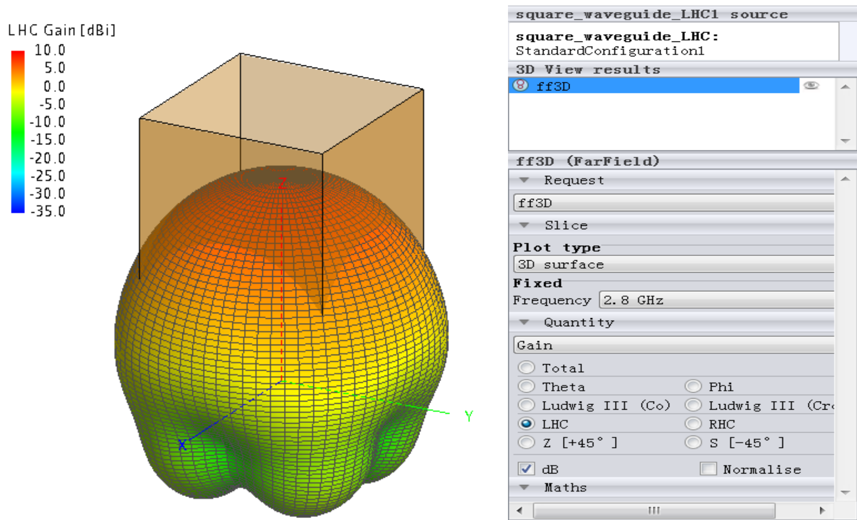


图 5-39　3D 辐射方向图显示（左旋圆极化）

显示 2D 结果：切换到“Home”菜单，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，单击“Far field”→“ffXOZ”，会在直角坐标系中直接显示 Phi=0° 极化平面上的 2D 增益方向图，在右侧控制面板的 Traces 区域，自动生成 ffXOZ，选中 Trace：ffXOZ，在控制面板中进行设置，选中“LHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-40 所示。

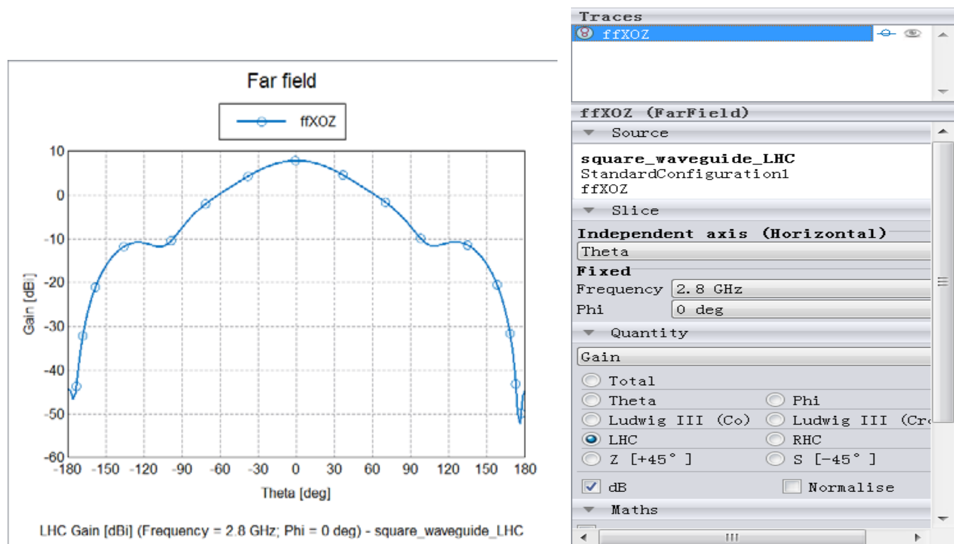


图 5-40　XOZ 平面辐射方向图（左旋圆极化）

在右侧控制面板的 Traces 区域，选中 ffXOZ，按〈Ctrl+K〉快捷键复制成 ffXOZ_1，选中 ffXOZ_1，在右侧控制面板中，修改设置，选中“RHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-41 所示。

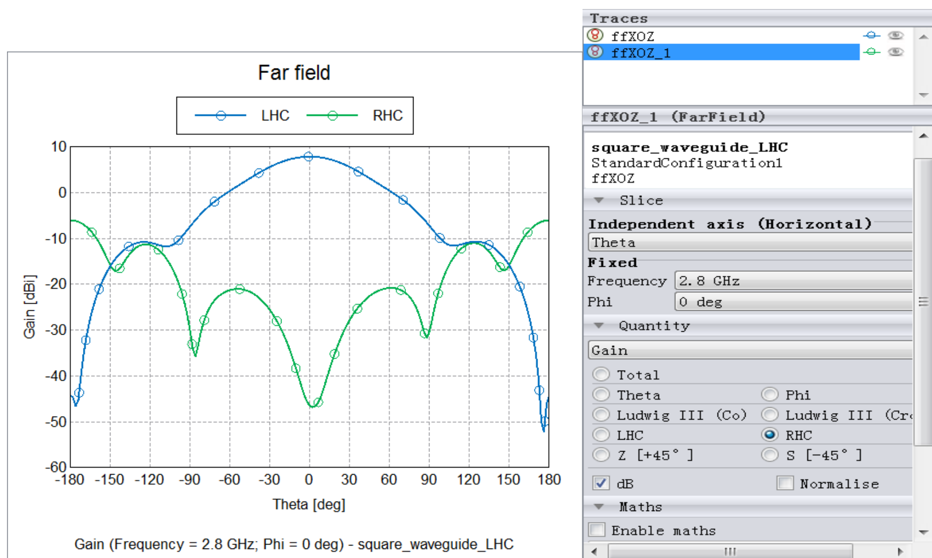


图 5-41　添加 XOZ 平面辐射方向图（右旋圆极化）

在“Home”菜单中，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph2”，单击“Far field”→“ffYOZ”，会在直角坐标系中直接显示 Phi=90° 极化平面上的 2D 增益方向图，在右侧控制面板的 Traces 区域，自动生成 ffYOZ，选中 Trace：ffYOZ，在控制面板中进行设置，选中“LHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-42 所示。

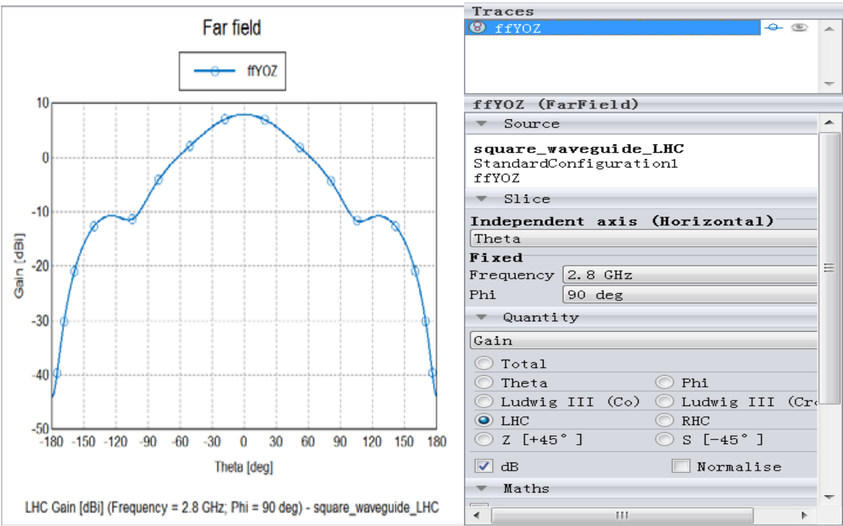


图 5-42　YOZ 平面辐射方向图（左旋圆极化）

在右侧控制面板的 Traces 区域，选中 ffYOZ，单击鼠标右键，选择“Duplicate trace”复制成 ffYOZ_1，选中 ffYOZ_1，在右侧控制面板中，修改设置，选中“RHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-43 所示。

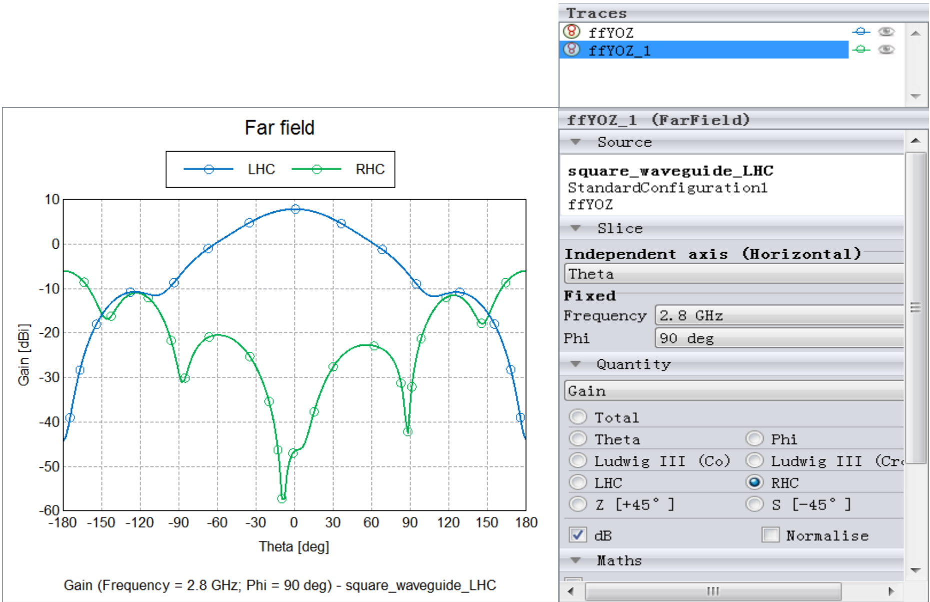


图 5-43　添加 YOZ 平面辐射方向图（右旋圆极化）

进入“Home”菜单，单击“Save project”，保存计算结果文件为“square_waveguide_LHC.pfs”，关闭 POSTFEKO。

方波导右旋圆极化的设置修改：切到 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，将其另存为“square_waveguide_ RHC.cfx”。

激励源设置：在左侧的树形浏览器中，切换到“Configuration”，展开“Global”→“Sources”结点，双击已经建立的“WaveguideSource1”，弹出“Modify waveguide source”对话框，如图 5-44 所示。

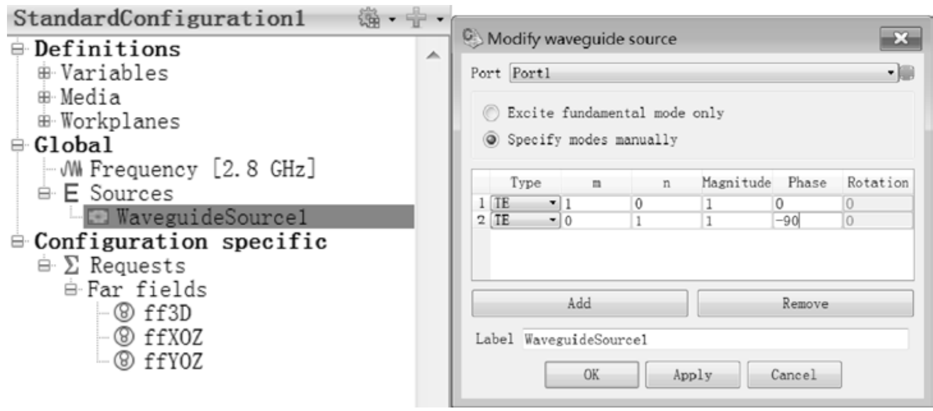


图 5-44　修改激励设置（右旋圆极化）

按照表 5-2 中的值进行设置。

表 5-2　参数设置

序号	Type	m	n	Magnitude	Phase
1	TE	1	0	1	0
2	TE	0	1	1	-90

然后在“Label”文本框中输入“WaveguideSource1”，单击“OK”按钮。

提交计算：单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮或按〈Alt+4〉快捷键，提交计算。

方波导右旋圆极化的结果显示：计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中，单击“Far field”→“ff3D”，在右侧控制面板中勾选“dB”复选框，选中“RHC”单选按钮。

进入“Mesh”菜单，单击“Mesh Opacity”下拉菜单，选择“40%”。这时，得到的 3D 显示效果如图 5-45 所示。

在右侧控制面板中勾选“dB”复选框，选中“LHC”单选按钮。这时，得到的 3D 显示效果如图 5-46 所示。

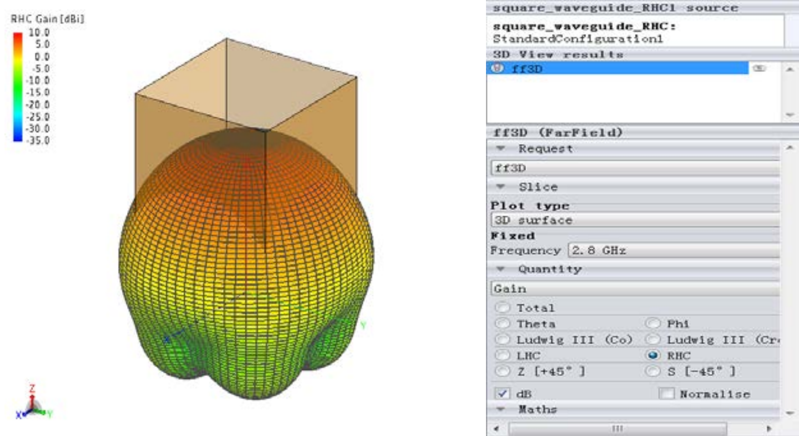


图 5-45　3D 辐射方向图显示（右旋圆极化）

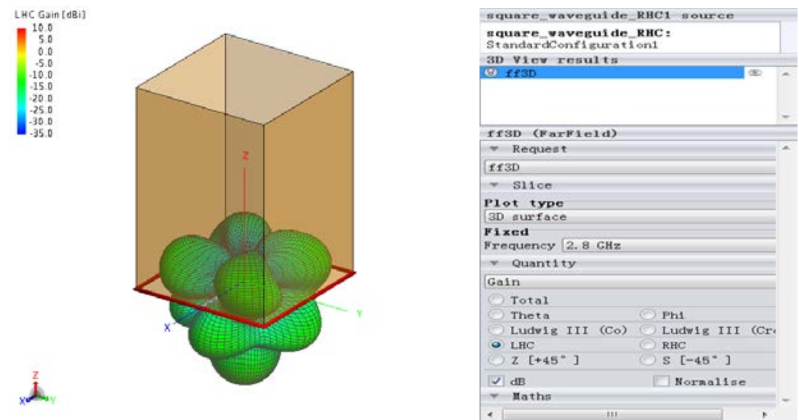


图 5-46　3D 辐射方向图显示（左旋圆极化）

显示 2D 结果：切换到“Home”菜单，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，单击“Far field”→“ffXOZ”，会在直角坐标系中直接显示 Phi=0° 极化平面上的 2D 增益方向图，在右侧控制面板的 Traces 区域，自动生成 ffXOZ，选中 Trace：ffXOZ，在控制面板中进行设置，选中“LHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-47 所示。

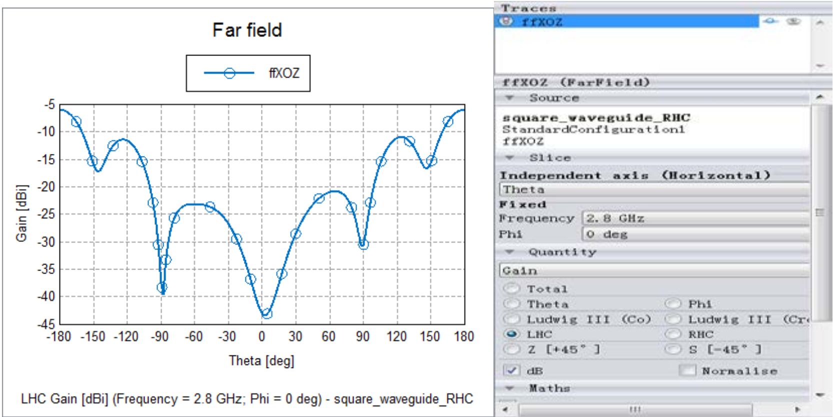


图 5-47　XOZ 平面辐射方向图（左旋圆极化）

在右侧控制面板的 Traces 区域中，选中 ffXOZ，按〈Ctrl+K〉快捷键复制成 ffXOZ_1，选中 ffXOZ_1，在右侧控制面板中，修改设置，选中“RHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-48 所示。

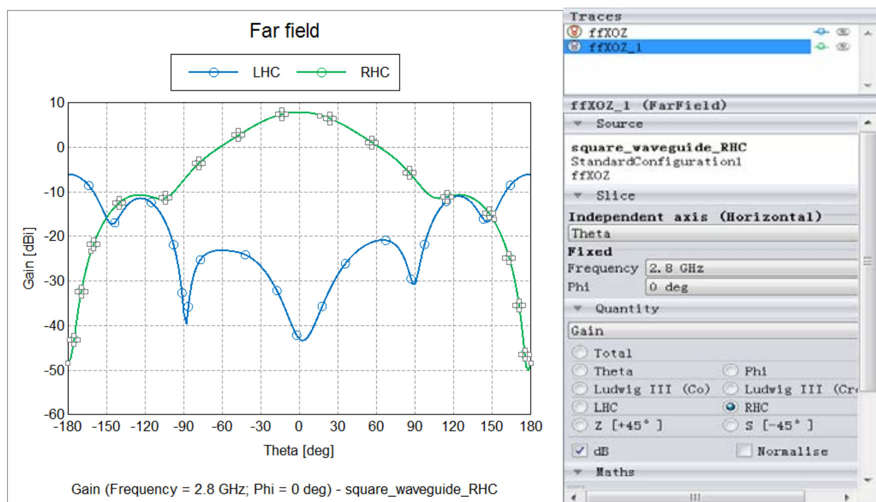


图 5-48　XOZ 平面辐射方向图（右旋圆极化）

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“square_waveguide_RHC.pfs”，关闭 POSTFEKO。

5.3　低频线圈天线

本节以应用于汽车智能进入及启动系统（PEPS）的低频线圈天线（见图 5-49）为例，介绍 FEKO 对低频问题的求解方法，以及采用体等效方法（Volume equivalence principle）计算铁氧体磁芯的方法和流程。

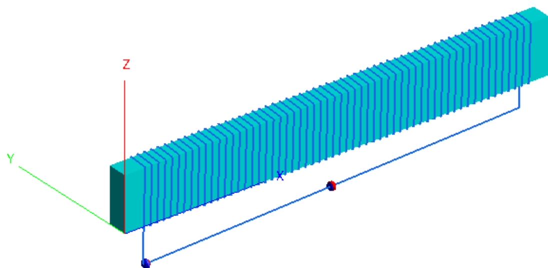


图 5-49　低频线圈天线

下面介绍低频线圈天线的仿真实现。

1．计算磁芯线圈的电感

启动 CADFEKO，新建一个工程“LF_ant_Inductor.cfx”。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中

“Millimetres(mm)”单选按钮。

（2）定义变量

在 CADFEKO 左侧的树形浏览器中，双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

磁芯几何尺寸：lx=64；ly=3；lz=8。

漆包线与磁芯的间隔：gap=0.1。

每个导线向 x 轴偏移的距离：gapx=0.255。

漆包线半径：wire_radius=0.1，如图 5-50 所示。

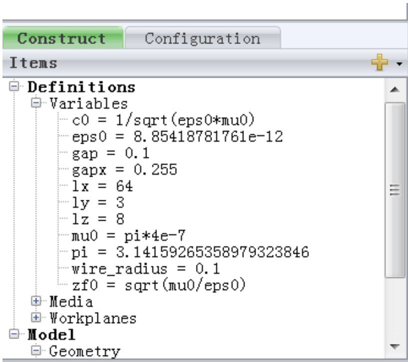


图 5-50　定义变量

（3）定义材料

在 CADFEKO 左侧的树形浏览器中，选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中，选择“Magnetic modelling”选项卡，在“Definition method”下拉列表框中选择“Frequency independent”选项。定义相对磁导率（Relative permeability）为 4200、磁损耗正切值（Magnetic loss tangent）为 0.0，名称定义为“ferrite”，单击“Create”按钮，如图 5-51 所示。

在 CADFEKO 左侧的树形浏览器中，选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Metallic medium”选项，创建有限电导率金属。按照图 5-52 所示，设置电导率为 58130000，名称定义为“Copper”，单击“Create”按钮。

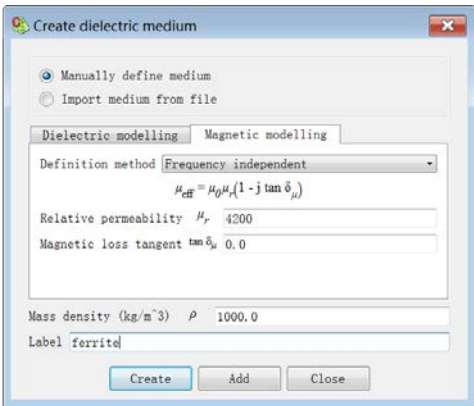


图 5-51　磁芯材料定义

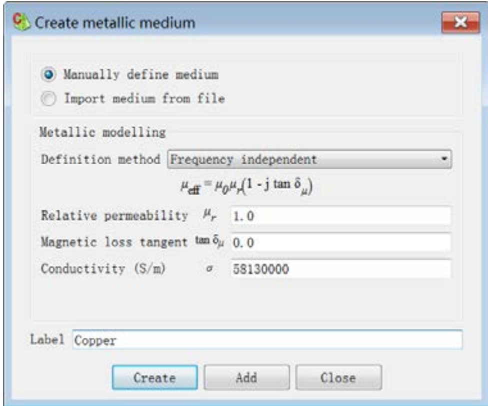


图 5-52　定义金属铜

（4）模型建立

在“Construct”菜单中，选择“Cuboid”，弹出“Create cuboid”对话框，如图 5-53 所示，进行如下设置。

Definition methods: Base corner, width, depth， height。

Base Corner (C)：U:0.0, V: 0.0, N: 0.0。

Width(W) : lx。

Depth(D): ly。

Height (H): lz。

Label: ferrite_cuboid。

单击“Create”按钮。

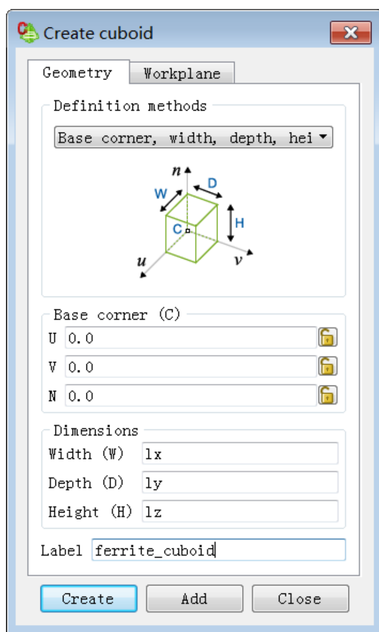


图 5-53　定义磁芯

选中模型“ferrite_cuboid”，在“Details”→“Region”中双击“region1??”，打开“Region properties”对话框，设置“Region medium”为“ferrite”，如图 5-54 所示。

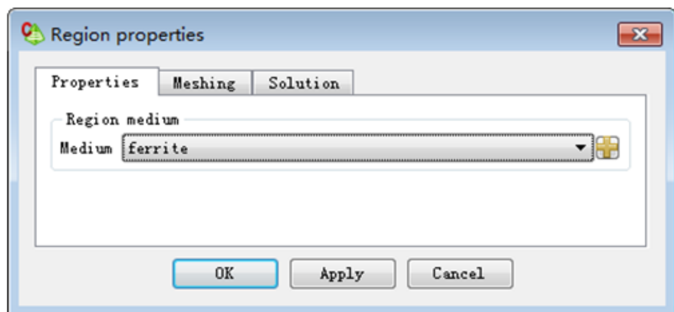


图 5-54　设置磁芯材料

再在该对话框中选择“Solution”选项卡，设置“Solution method”为“MoM/MLFMM with volume equivalence principle (VEP)”，如图 5-55 所示。设置磁芯的求解方法为 VEP。

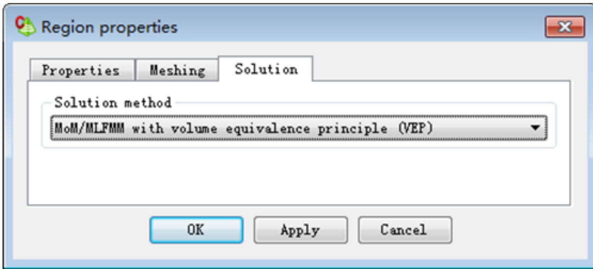


图 5-55　设置磁芯材料的求解方法

在“Construct”菜单中，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，如图 5-56 所示，进行如下设置。

Start point：（U：ly−gapx , V：−gap, N：−gap）。

End point：（U：ly, V：−gap, N：lz+gap）。

Label：Line1。

然后单击“Add”按钮。

修改 Start point：（U：ly, V：−gap, N：lz+gap）。

End point：（U：ly+gapx, V：ly+gap, N：lz+gap）。

Label：Line2。

然后单击“Add”按钮，如图 5-57 所示。

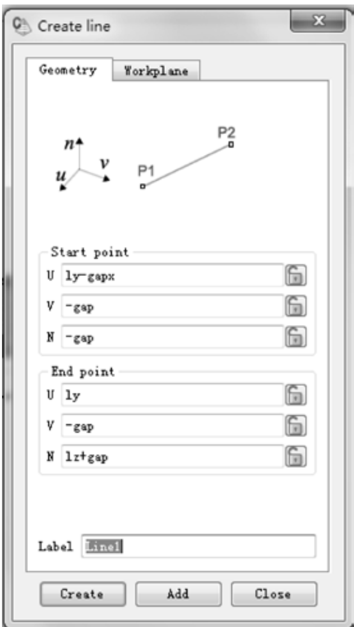


图 5-56　创建线模型 Line1

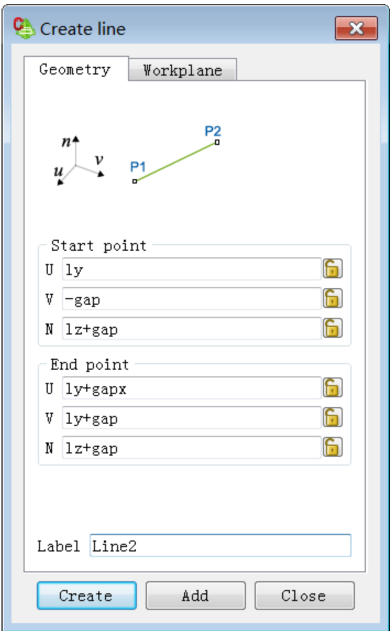


图 5-57　创建线模型 Line2

修改 Start point：（U：ly+gapx, V：ly+gap, N：lz+gap）。

End point：（U：ly+gapx*2, V：ly+gap, N：-gap）。

Label：Line3。

然后单击“Add”按钮，如图 5-58 所示。

修改 Start Point：（U：ly+gapx*2, V：ly+gap, N：-gap）。

End point：（U：ly+gapx*3, V：-gap, N：-gap）。

Label：Line4。

然后单击“Create”按钮，如图 5-59 所示。

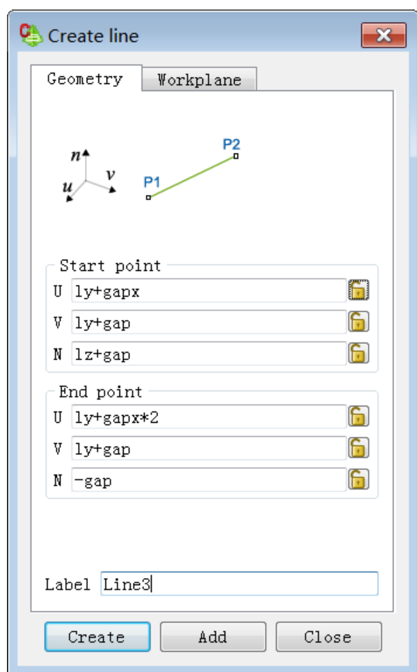


图 5-58　创建线模型 Line3

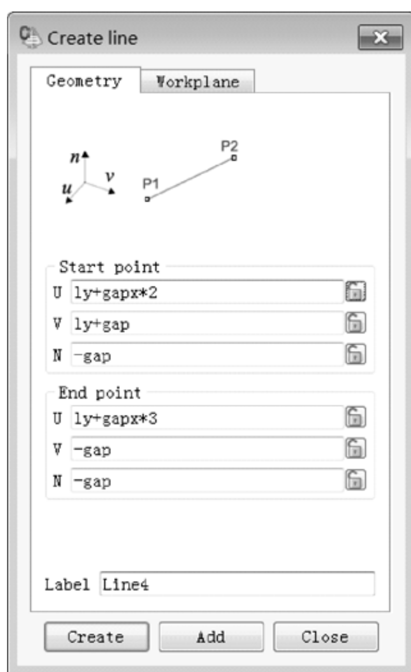


图 5-59　创建线模型 Line4

选择线模型“Line1”及“Line2”，单击鼠标右键，选择“Copy speical”→“Copy and translate”选项，弹出“Copy and translate”对话框，如图 5-60 所示，进行如下设置。

From：（U：ly, V：-gap, N：lz+gap）。

To：（U：ly+gapx*4, V：-gap, N：lz+gap）。

Number of copies：57。

选择线模型“Line3”，单击鼠标右键，选择“Copy speical”→“Copy and translate”选项，弹出“Copy and translate”对话框，如图 5-61 所示，进行如下设置。

From：（U：ly+gapx, V：ly+gap, N：lz+gap）。

To：（U：ly+gapx+gapx*4, V：ly+gap, N：lz+gap）。

Number of copies：56。

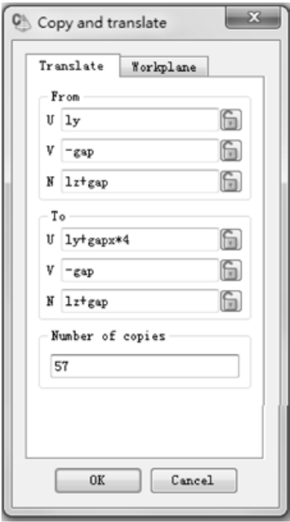


图 5-60　复制并平移线模型 Line1 及 Line2

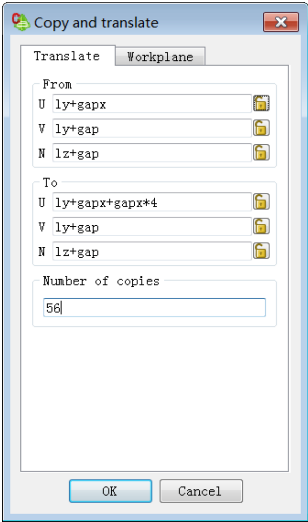


图 5-61　复制并平移线模型 Line3

选择线模型“Line4”，单击鼠标右键，选择“Copy speical”→“Copy and translate”选项，弹出“Copy and translate”对话框，如图 5-62 所示，进行如下设置。

From：（U：ly+gapx*2, V：ly+gap, N：-gap）。

To：（U：ly+gapx*2+gapx*4, V：ly+gap, N：-gap）。

Number of copies：56。

在“Construct”菜单中，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，如图 5-63 所示，进行如下设置。

Start point：（U：ly-gapx , V：-gap, N：-gap）。

End point：（U：ly-gapx, V：-gap, N：-5.1）。

Label：Line1_58。

然后单击“Add”按钮。

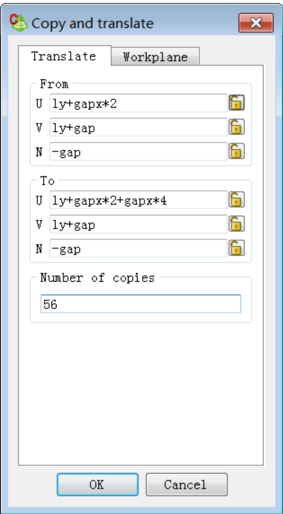


图 5-62　复制并平移线模型 Line4

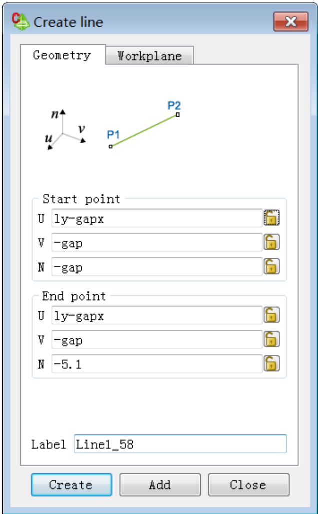


图 5-63　创建线模型 Line1_58

修改 Start point：（U：61.395+gapx*2, V：3.1, N：−5.1）。

End point：（U：61.395, V：3.1, N：8.1）。

Label：Line5。

然后单击“Add”按钮，如图 5-64 所示。

修改 Start point：按〈Ctrl+Shift〉快捷键，选择 Line1_58 的 End point。

End point：按〈Ctrl+Shift〉快捷键，选择 Line5 的 Start point。

Label：Line6。

然后单击“Create”按钮。

选择所有 Line 模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，对所有 Line 模型进行 Union 操作。对新生成的模型，选择“Details”→“Wires”下的所有 wire，单击鼠标右键，设置“Wire core medium”为“Copper”，如图 5-65 所示。

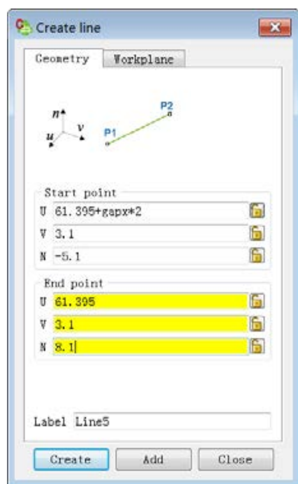


图 5-64　创建线模型 Line5

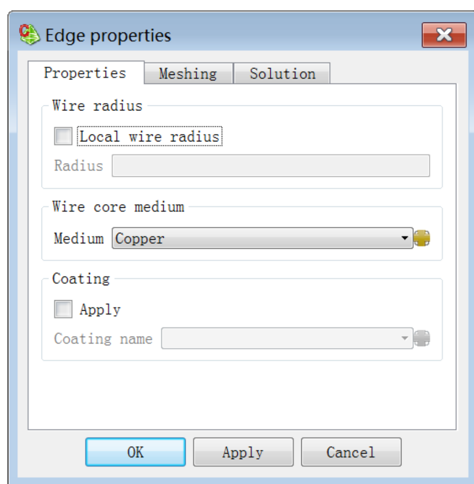


图 5-65　设置所有线模型的材料属性为 Copper

（5）端口创建

在“3D”视图中选择 Line6 的 Edge，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，如图 5-66 所示，设置“Location on wire”为“Middle”，单击“Create”按钮。

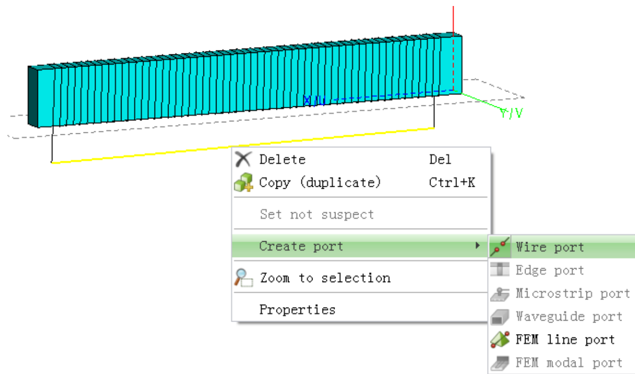


图 5-66　创建 Port1

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，选择“Single frequency”，在“Frequency (Hz)”中输入“125e3”。

（6）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，选择“Port1”，默认电压源的幅度为 1V，相位为 0deg，单击“Create”按钮。

（7）设置低频稳定性

在“Solve/Run”菜单中单击“Solver setting”，弹出“Solver settings”对话框，勾选“Active low frequency stabilization for MoM”复选框，如图 5-67 所示。

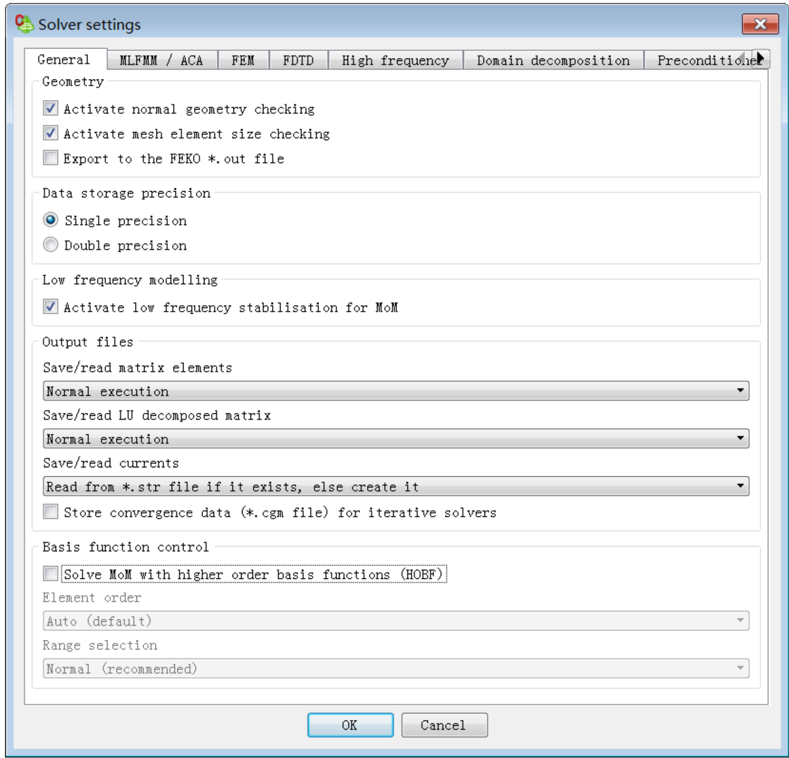


图 5-67　勾选低频稳定设置

（8）网格划分

在“Mesh”菜单中单击“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，如图 5-68 所示，进行如下设置。

网格剖分方法 Mesh size ：Custom。

Wire segment length：2。

Tetrahedral edge length：2。

Wire segment radius：wire_radius。

然后单击“Mesh”按钮生成网格。

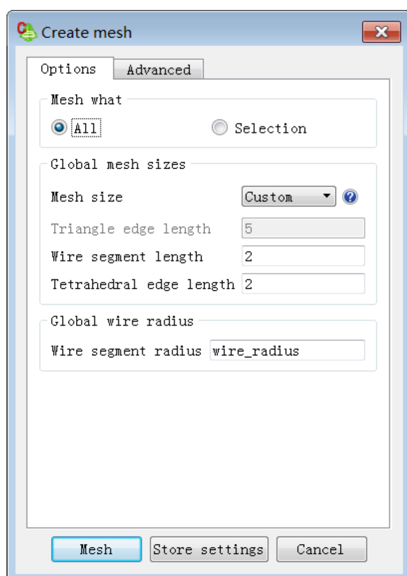


图 5-68　网格设置及剖分

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（9）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。在“Home”菜单的“Create new display”中单击“Cartesian”。单击“Source data”→“VoltageSource1”，在右侧控制面板的 Traces 区域中，选中 Trace：VoltageSource1，在控制面板中设置 Impedance。可分别得到阻抗的实部：0.759Ohm、虚部：87.1Ohm，如图 5-69 所示。

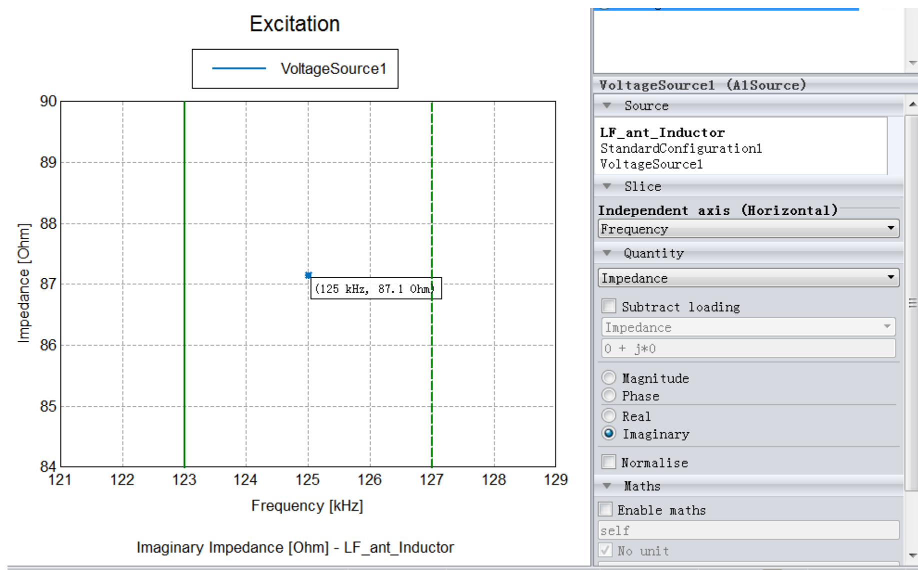


图 5-69　端口阻抗虚部

勾选右侧控制面板中的“Enable maths”复选框，输入“self/(2*PI*125e3)*1e6”，得到电感值 111μH，如图 5-70 所示。

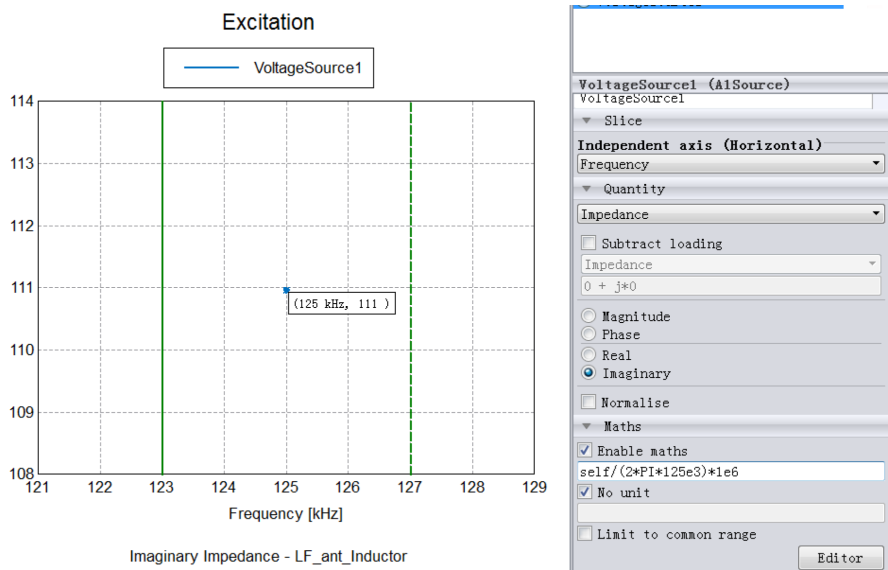


图 5-70　端口阻抗的电感值

2．低频线圈天线

将该工程另存为“LF_ant.cfx”。

在“3D”视图中选择 Line6 的 Edge，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，设置“Location on wire”为“Start”，创建端口 Port2，如图 5-71 所示。

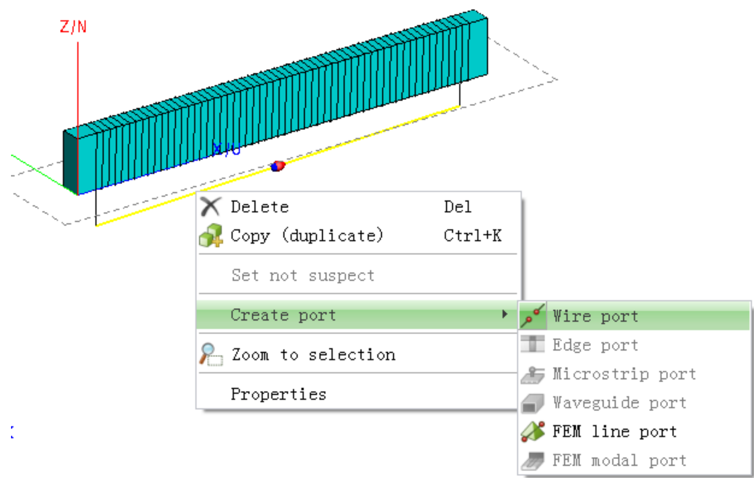


图 5-71　创建 Port2

在“Configuration”中，右键单击“Gloabl”结点，选择“Add load”选项。为 Port1 添加大电阻 Load1，阻值为 1e6Ohm，如图 5-72 所示；为 Port2 添加容性负载 Load2，容值为

15nF，如图 5-73 所示。

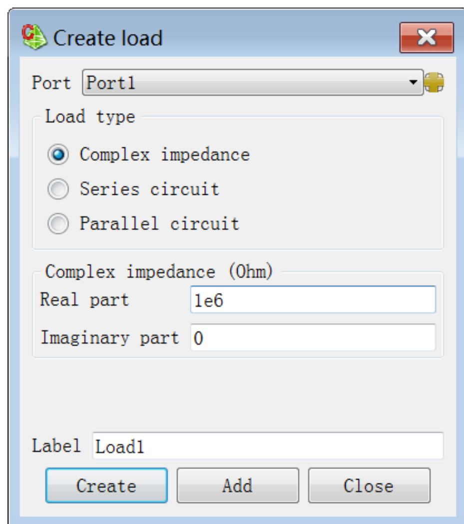


图 5-72　Load1 定义

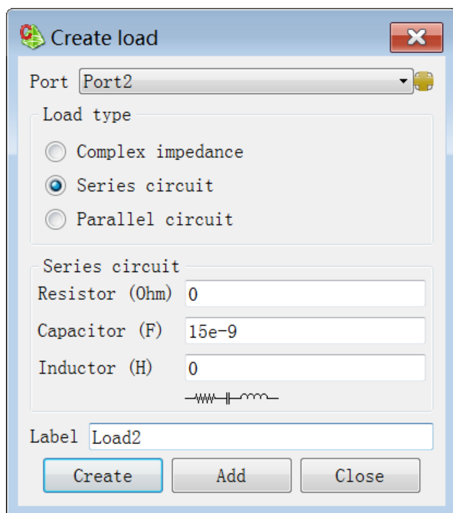


图 5-73　Load2 定义

双击激励“VoltageSource1”，修改“Magnitude”为 0.8e6，与 Port1 上的大电阻串联，保证端口的激励电流约为 800mA，如图 5-74 所示。

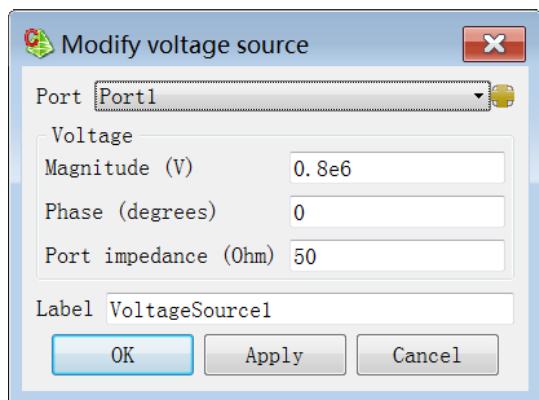


图 5-74　修改 Port1 上的激励电压

展开“Contiguration specific”，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Near fields”选项，弹出“Request near fields”对话框，如图 5-75 所示。在“Position”选项卡中进行如下设置。

Definition methods：Cartesian。

Start：(U:−400; V：−10, N：−400)。

End：(U：lx+400; V：−10, N：400)。

采样方式为：Specify increments。

Increment：（U：10, V:0, N:10）

Label：NearField1。

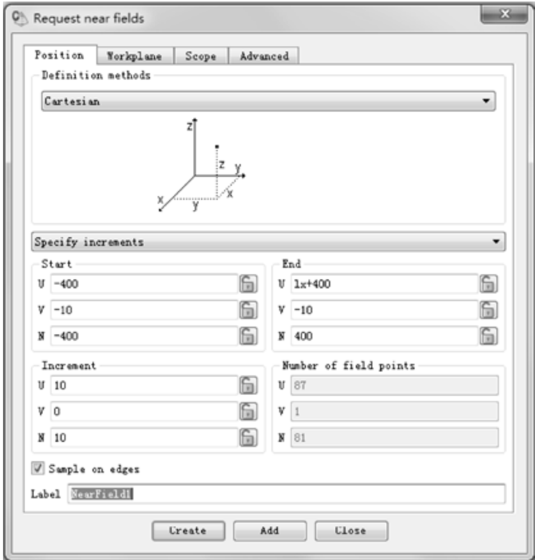


图 5-75　创建近场观测面

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

打开 POSTFEKO，在“Home”菜单中选择“Near field”→“Near field1”，在右侧控制窗口中选择“Magnetic field”选项，并勾选“dB”复选框，得到磁场分布图，如图 5-76 所示。

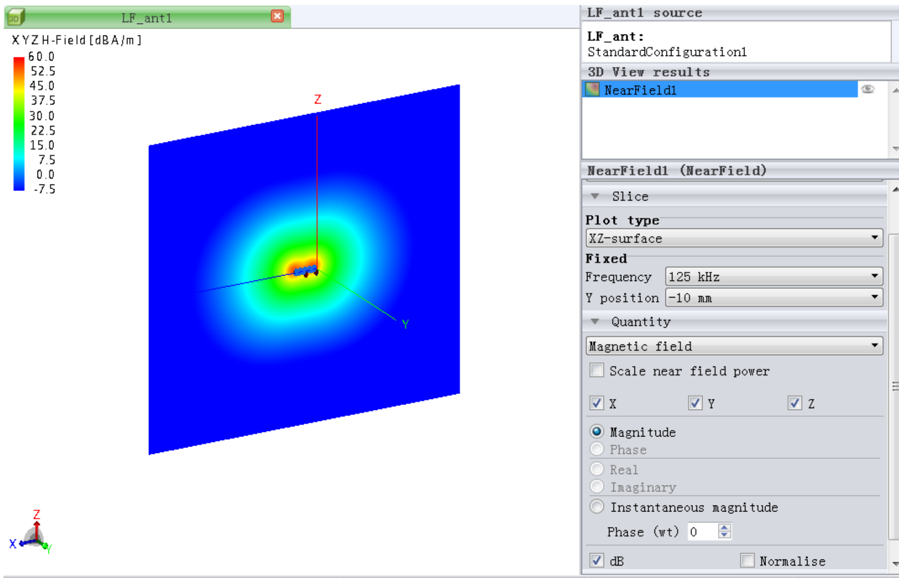


图 5-76　近场磁场分布图

5.4　圆波导圆极化天线

圆形波导喇叭天线由圆形波导终端逐渐张开形成。圆形波导和圆锥波导传输 TE11 模。

在本节中将介绍应用 FEKO 仿真圆波导圆极化天线，涉及 Waveguide Port 与波导激励、圆极化以及高次模的设置方法和应用。

波导圆极化天线的全模型示意图如图 5-77 所示。

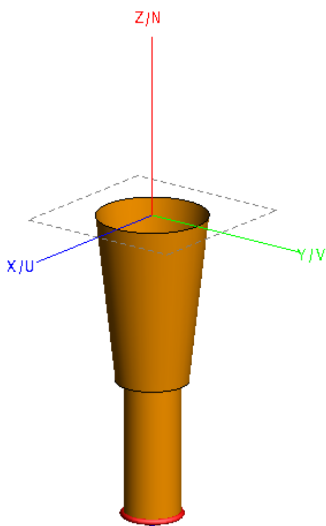


图 5-77　波导圆极化天线的全模型示意图

计算方法描述：采用多层快速多极子方法（MLFMM）。

计算参数：

圆波导主模圆极化——TE11 模式 12.5GHz。

高次模圆极化——TE21 模式 15GHz。

计算该类天线的圆极化辐射方向图。

5.4.1 TE11 模圆极化仿真

启动 CADFEKO，新建一个工程“Circular_waveguide_TE11_LHC.cfx”。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=12.5e9。

工作波长：lam = c0/freq。

波导波长：lam_w=0.0293。

圆波导半径：wg_r=0.51*lam。

圆波导高度：wg_L=2*lam_w。

开口圆喇叭开口半径：horn_r=lam。

开口圆喇叭底部半径：horn_r0=0.65*lam。

开口圆喇叭高度：horn_L=3.05*lam，如图 5-78 所示。

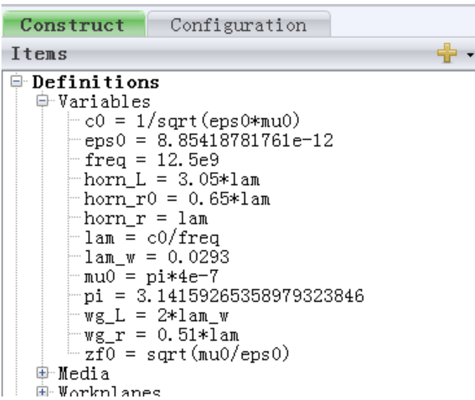


图 5-78　变量定义

（2）圆波导天线模型建立

在“Construct”菜单中，单击“Cylinder”按钮，弹出“Create cylinder”对话框，在“Geometry”选项卡中进行如下设置。

Base centre (B)：(U：0.0; V：0.0; N：−wg_L−horn_L)。

Radius (R)：wg_r。

Height(H)：wg_L。

Label：waveguide。

然后单击“Create”按钮，如图 5-79 所示。按〈F5〉键，在 3D 视图中适中显示模型。

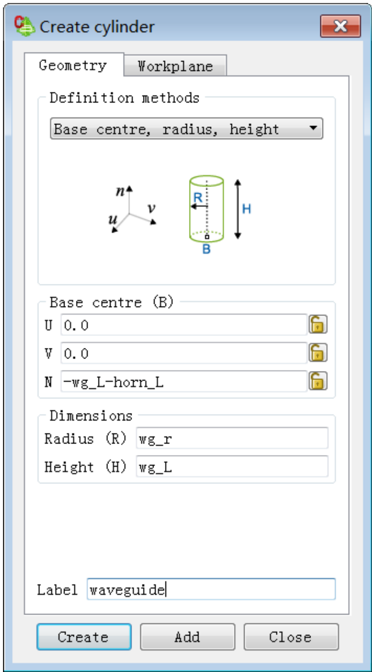


图 5-79　定义圆波导天线波导部分 1

在“Construct”菜单中单击“Cone”按钮，弹出“Create cone”对话框，如图 5-80 所

示。在“Geometry”选项卡中进行如下设置。

Base centre (B)：(U：0.0; V：0.0; N：－horn_L)。

Base Radius (Rb)：horn_r0。

Height(H)：horn_L。

Top radius (Rt): horn_r。

Label：flare。

然后单击“Create”按钮。

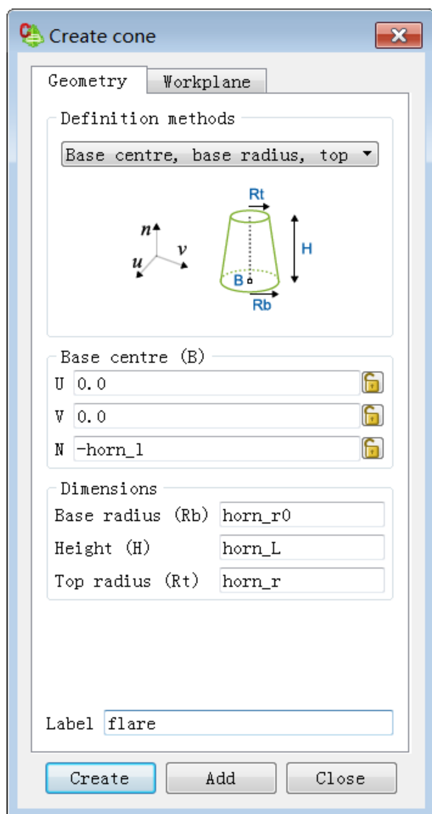


图 5-80　定义圆波导天线波导部分 2

在左侧的树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，同时选中新建的模型“waveguide”和“flare”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项（或直接按〈U〉键），把新生成的模型更名为“horn”。

在左侧的树形浏览器中，选中模型“horn”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simplify”选项，弹出“Simplify geometry”对话框，采用默认设置，进行模型冗余处理（会删除模型“waveguide”和“flare”中间的公共面，因为该面的前向和后向区域材料相同，且该面的属性也与前后向区域材料相同）。

在 3D 视图中，选中新建模型“horn”的顶部面元（即 z=0 的面），单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除该面元，如图 5-81 所示。

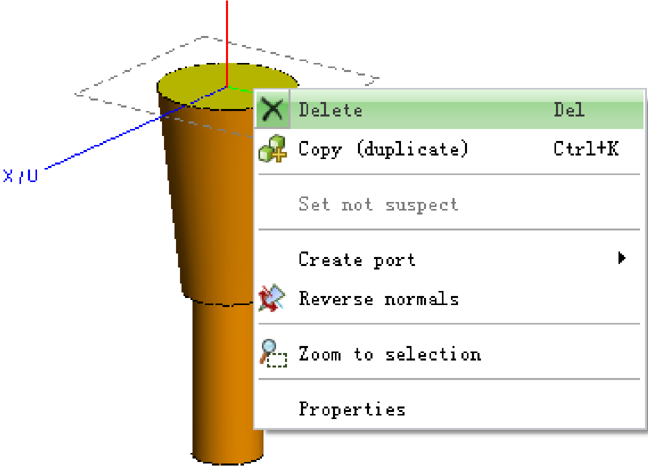


图 5-81 删除顶部面元

在 3D 视图区域，进入面选模式（光标定在模型的某一面上，依次单击鼠标左键，可以在体选、面选上自动切换），选中新建喇叭天线“horn”的最底部面元（z=-(wg_h+horn_L)的面元），单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，如图 5-82 所示，在“Meshing”选项卡中，勾选“Local mesh size”复选框，在“Mesh size”文本框中输入“lam/15”，单击“OK”按钮。

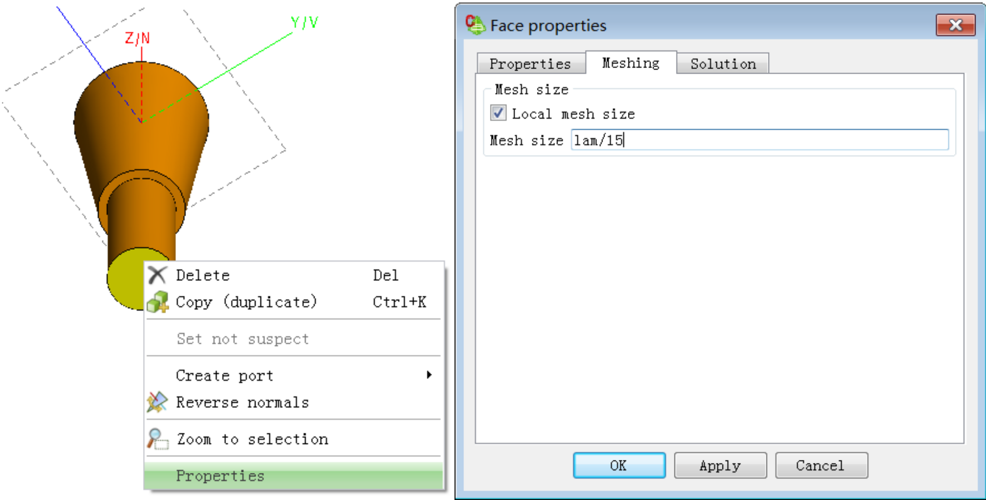


图 5-82 定义波导端口网格

（3）设定波导端口

在 3D 视图区域，把模型移动并缩放到适合的角度，单击鼠标左键自动切换到面选模式，选中新建圆波导天线底部面元（z=-(wg_h+horn_L)的面元），单击鼠标右键，选择“Create port”→“Waveguide port”选项，如图 5-83 所示，弹出“Create waveguide port (geometry)”对话框，如图 5-84 所示。勾选“Propagation direction opposite to normal”复选框，目的是使该面添加的波导信号向里传播，即红色箭头朝里。在“Label”文本框中输入

“Port1”，单击“Create”按钮。

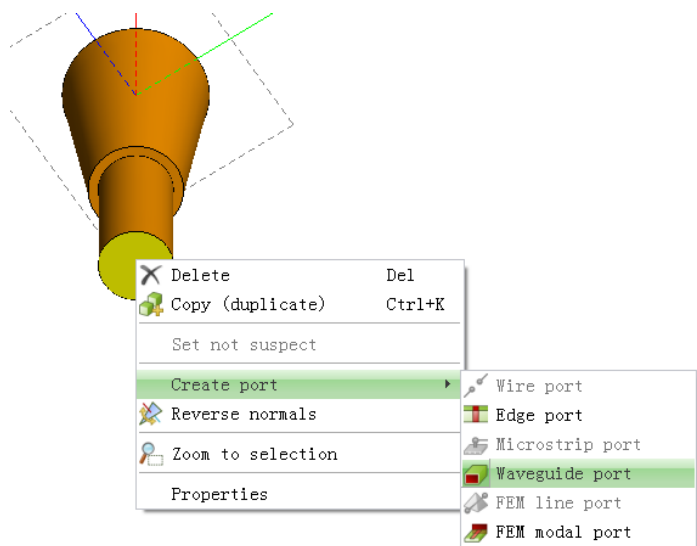


图 5-83 定义波导端口

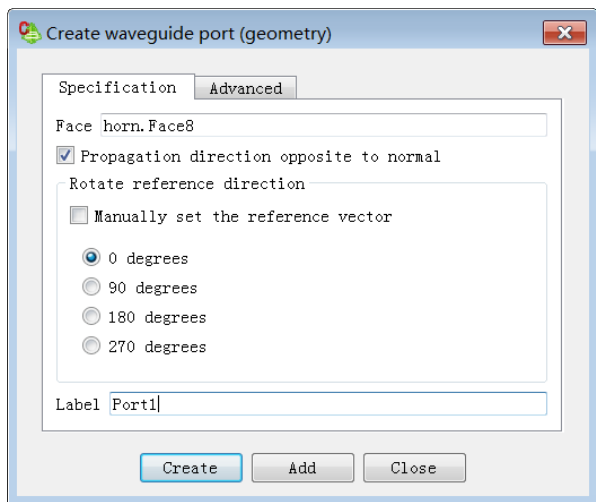


图 5-84 选择波导信号传播方向

（4）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，选择“Single frequency”，设置“Frequency (Hz)”为“freq”，单击“OK”按钮。

（5）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Waveguide source”选项，如图 5-85 所示，弹出“Add waveguide source”对话框，选中“Excite fundamental mode only”单选按钮，“Fundamental mode”的设置如下。

Magnitude: 1。

Phase: 0。

Rotation: 0。

然后单击“Add”按钮，在“Label”文本框中输入“WaveguideSource1”。

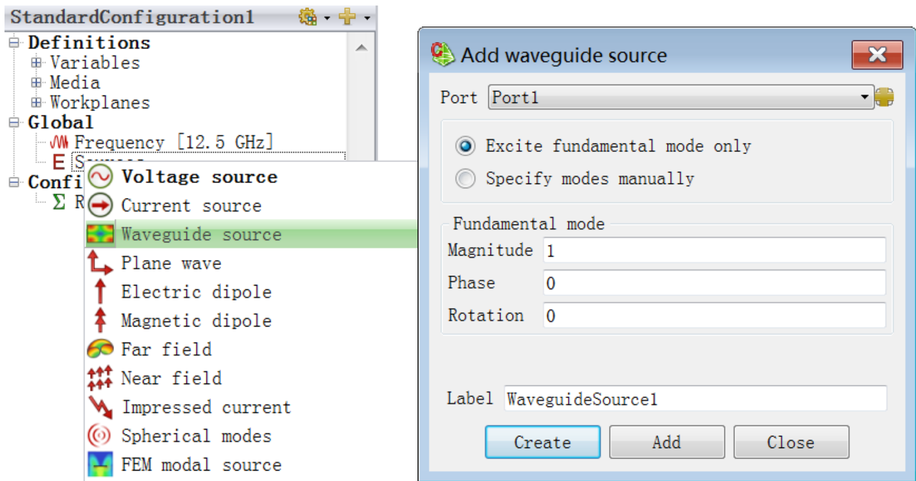


图 5-85　定义端口激励 WaveguideSource1

重复上述步骤，在“Add waveguide source”对话框中进行如下设置。

Fundamental mode:

Magnitude: 1。

Phase: 90。

Rotation: 90。

在“Label”文本框中输入“WaveguideSource2”。

最后单击“Create”按钮，如图 5-86 所示。

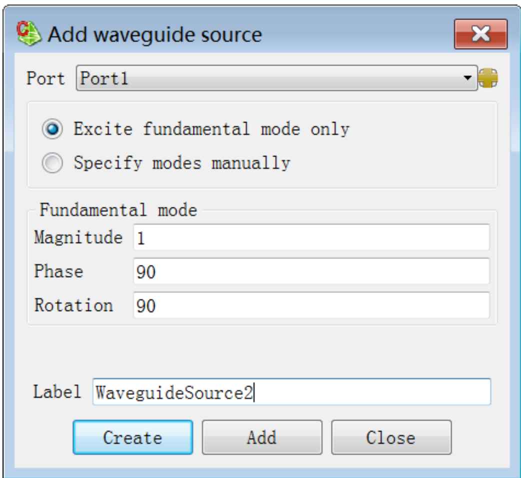


图 5-86　定义端口激励 WaveguideSource2

（6）求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，如图 5-87 所示，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮，修改 theta 的“Increment”为 2，Phi 的“Increment”为 5.0。

在“Label”文本框中输入“ff3D”，最后单击“Create”按钮。

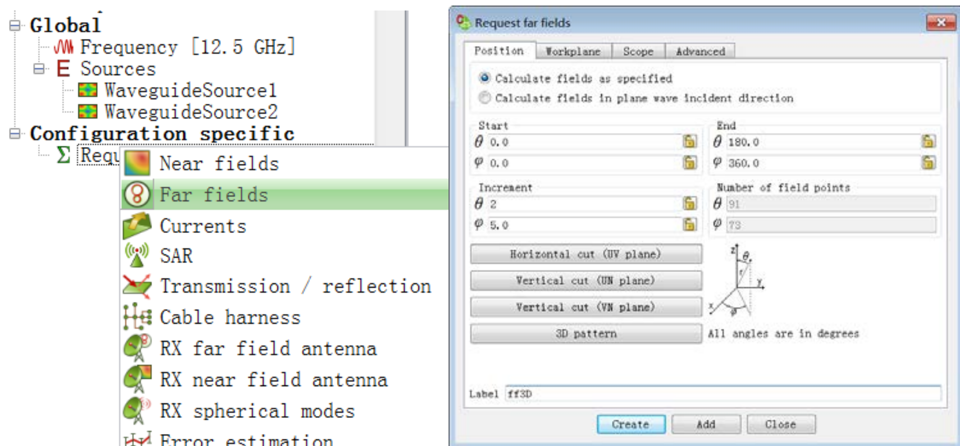


图 5-87　远场方向图求解设置（3D pattern）

（7）网格划分

在“Mesh”菜单中单击“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框进行如下设置。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangle edge length”：lam/8。

然后单击“Mesh”按钮，生成网格，如图 5-88 所示。

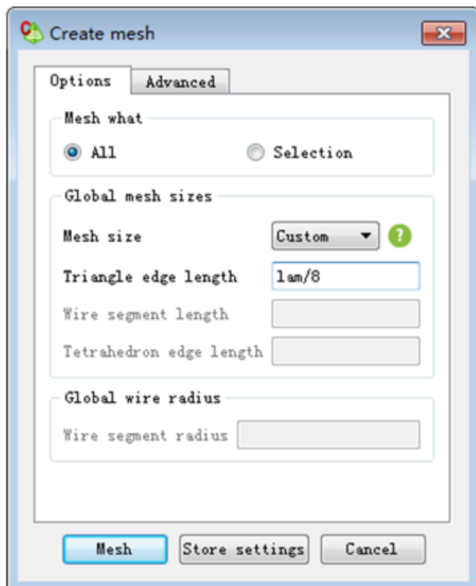


图 5-88　定义网格划分

（8）设置计算方法

在“Solve/Run”菜单中单击“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，选择“MLFMM/ACA”选项卡，选中“Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)”单选按钮，单击“OK”按钮，如图 5-89 所示。

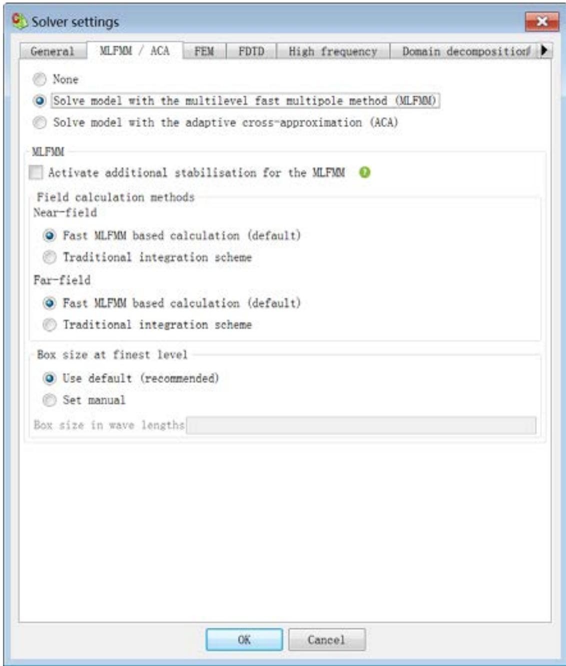


图 5-89　设置计算方法为 MLFMM

（9）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式，如图 5-90 所示。

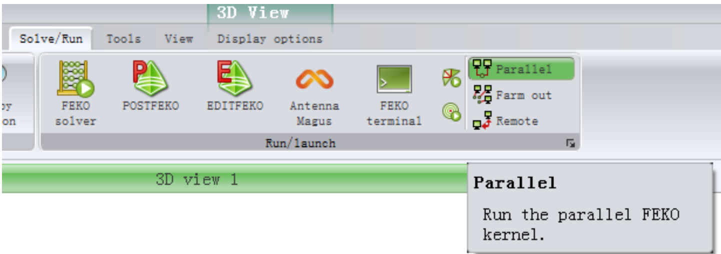


图 5-90　选择并行求解

（10）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

（11）显示 2D 结果

在“Home”菜单中单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，单击“Far

field”→“ff3D”，会在直角坐标系中直接显示 Phi=0° 极化平面上的 2D 增益方向图。在右侧控制面板的 Traces 区域，自动生成 ff3D，选中 Trace：ff3D，在控制面板中进行如下设置。

Independent axis(Horizontal): Theta(wrapped)。

Fixed-Phi: 0 deg(wrapped)。

然后选中“LHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-91 所示。

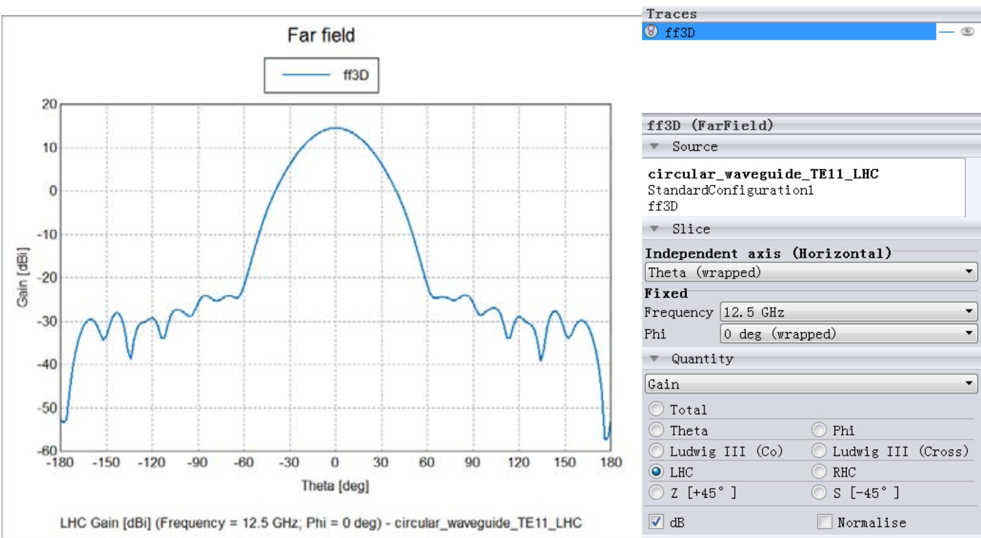


图 5-91　XOZ 平面辐射方向图（左旋圆极化）

在右侧控制面板的 Traces 区域中，选中 ff3D，按〈Ctrl+K〉快捷键复制成 ff3D_1，选中 ff3D_1，在右侧控制面板中，修改设置，勾选“dB”复选框，选中“RHC”单选按钮，如图 5-92 所示。

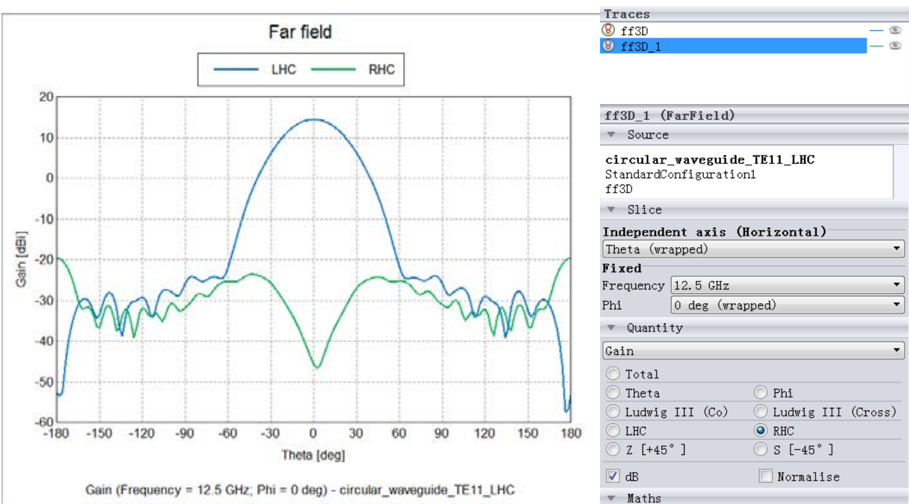


图 5-92　添加 XOZ 平面辐射方向图（右旋圆极化）

在“Home”菜单中，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph2”，单击

“Far field”→“ff3D”，在右侧控制面板的 Traces 区域中，自动生成 ff3D，选中 Trace：ff3D，在控制面板中进行如下设置。

Independent axis(Horizontal): Theta(wrapped)。

Fixed-Phi: 90 deg(wrapped)。

然后勾选“dB”复选框，选中“LHC”单选按钮，如图 5-93 所示。

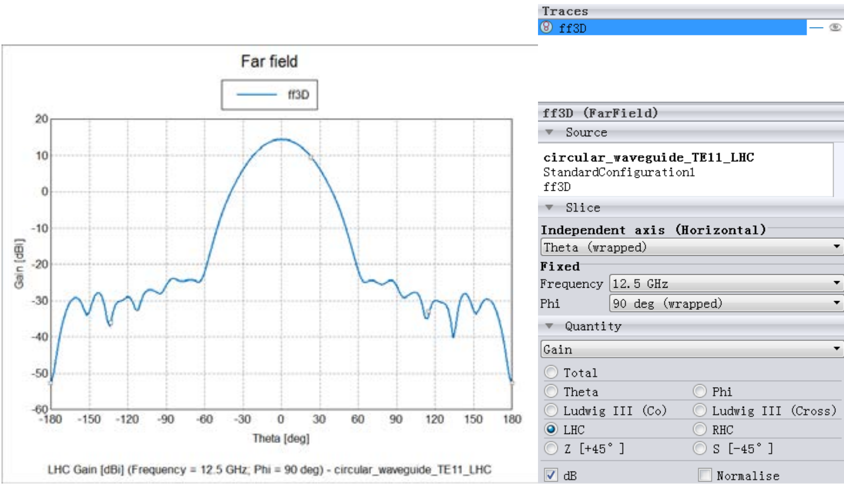


图 5-93　YOZ 平面辐射方向图（左旋圆极化）

在右侧控制面板的 Traces 区域中，选中 ff3D，单击鼠标右键，选择“Duplicate trace”选项以复制成 ff3D_1，选中 ff3D_1，在右侧控制面板中，修改设置，选中“RHC”单选按钮，勾选“dB”复选框，如图 5-94 所示。

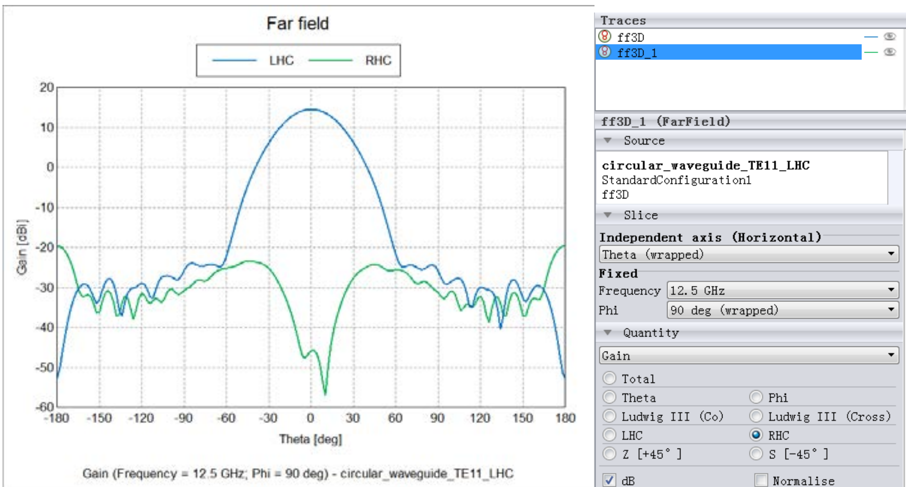


图 5-94　YOZ 平面辐射方向图（右旋圆极化）

（12）显示该波导结构的模式

在“Home”菜单中，单击“Out file”中的“Circular_waveguide_TE11_LHC.out”文件，直接打开该文件，拖动右侧的滚动条，显示如图 5-95 所示的内容。

```
                    MODE EXPANSION DATA OF WAVEGUIDE PORT

Port label:          horn.Face8
Port type:           Circular
Port radius:         1.22315E-02 m
Port reference points:                   S1             S2
                              X =  4.06523E-19 m  1.22315E-02 m
                              Y = -3.76718E-19 m -3.76718E-19 m
                              Z = -1.31749E-01 m -1.31749E-01 m
Frequency:           1.25000E+10 Hz
```

Mode indices			Cutoff freq.	Transverse wave impedance		Propagation factor		Description	
	m	n	in Hz	real part	imag. part	real part	imag. part		
TE	0	1	1.49469E+10	0.00000E+00	5.74622E+02	1.71758E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TE	0	2	2.73668E+10	0.00000E+00	1.93431E+02	5.10239E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TE	1	1	7.18219E+09	4.60296E+02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.14418E+02	Propagating	Impressed (active)
TE	1	2	2.07972E+10	0.00000E+00	2.83316E+02	3.48360E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TE	2	1	1.19141E+10	1.24515E+03	0.00000E+00	0.00000E+00	7.92642E+01	Propagating	
TE	2	2	2.61597E+10	0.00000E+00	2.04923E+02	4.81624E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TE	3	1	1.63882E+10	0.00000E+00	4.44328E+02	2.22124E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TE	3	2	3.12663E+10	0.00000E+00	1.64317E+02	6.00645E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TE	4	1	2.07430E+10	0.00000E+00	2.84477E+02	3.46938E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TE	4	2	3.62093E+10	0.00000E+00	1.38572E+02	7.12237E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	0	1	9.38088E+09	2.48983E+02	0.00000E+00	0.00000E+00	1.73144E+02	Propagating	
TM	0	2	2.15330E+10	0.00000E+00	-5.28430E+02	3.67474E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	1	1	1.49469E+10	0.00000E+00	-2.46990E+02	1.71758E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	1	2	2.73668E+10	0.00000E+00	-7.33728E+02	5.10239E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	2	1	2.00333E+10	0.00000E+00	-4.71822E+02	3.28108E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	2	2	3.28345E+10	0.00000E+00	-9.15063E+02	6.36341E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	3	1	2.48881E+10	0.00000E+00	-6.48619E+02	4.51054E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	3	2	3.80764E+10	0.00000E+00	-1.08396E+03	7.53793E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	4	1	2.96010E+10	0.00000E+00	-8.08683E+02	5.62363E+02	0.00000E+00	Evanescent	
TM	4	2	4.31618E+10	0.00000E+00	-1.24508E+03	8.65839E+02	0.00000E+00	Evanescent	

图 5-95　模式分布

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“Circular_waveguide_TE11_LHC.pfs”，关闭 POSTFEKO。

5.4.2　高次模圆极化的实现

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把工程“Circular_waveguide_TE11_LHC.cfx”另存为“Circular_waveguide_TE21_LHC.cfx”，修改变量 freq=15e9，重新生成网格。

（1）修改激励设置

在左侧的树形浏览器中，切换到“Configuration”，展开“Global”→“Sources”结点，删除“WaveguideSource2”，双击已经建立的“WaveguideSource1”，弹出“Modify waveguide source”对话框，如图 5-96 所示，选中“Specify modes manually”单选按钮。

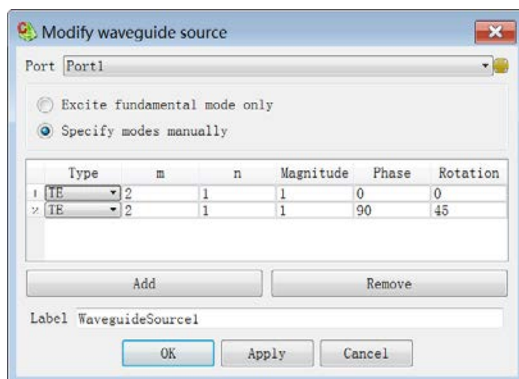


图 5-96　为 TE21 模式修正激励设置

按照表 5-3 中的值进行设置。

表 5-3　参数设置

序号	Type	m	n	Magnitude	Phase	Rotation
1	TE	2	1	1	0	0
2	TE	2	1	1	90	45

然后在“Label”文本框中输入“WaveguideSource1”，单击“OK”按钮。

（2）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（3）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

（4）显示 2D 结果

在“Home”菜单中，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，单击“Far field”→“ff3D”，会在直角坐标系中直接显示 Phi=0° 极化平面上的 2D 增益方向图。在右侧控制面板的 Traces 区域中，自动生成 ff3D，选中 Trace：ff3D，在控制面板中进行如下设置。

Independent axis(Horizontal)：Theta(wrapped)。

Fixed-Phi：0 deg(wrapped)。

然后，勾选“dB”复选框，选中“LHC”单选按钮，如图 5-97 所示.

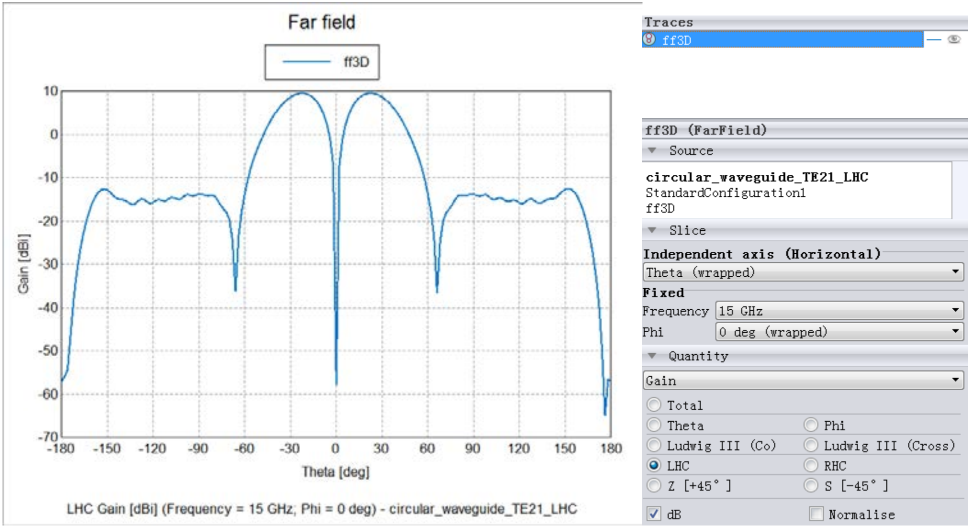


图 5-97　XOZ 平面辐射方向图(左旋圆极化)

在右侧控制面板的 Traces 区域中，选中 ff3D，按〈Ctrl+K〉快捷键以复制成 ff3D_1，选中 ff3D_1，在右侧控制面板中，修改设置，勾选“dB”复选框，选中“RHC”单选按钮，如图 5-98 所示。

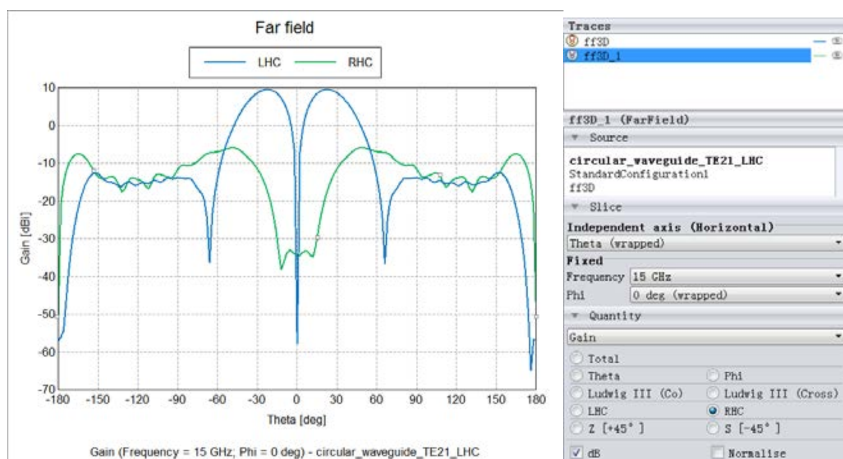


图 5-98　XOZ 平面辐射方向图（右旋圆极化）

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“Circular_waveguide_TE21_LHC.pfs”，关闭 POSTFEKO。

5.5　偏馈反射面天线

反射面天线是一种高增益天线，被广泛应用于通信、雷达和射电天文领域。反射面天线具有高增益或窄波束的特点，通过增大反射面的尺寸可提高增益。大尺寸的反射面天线由于电尺寸大，通常仿真困难。FEKO 非常适合反射面天线的仿真，其仿真方法有以下几种。

1）多层快速多极子方法（MLFMM）：MLFMM 是精确的全波算法，可以计算电大尺寸反射面天线并获得精确的计算结果；

2）物理光学方法（PO）：PO 是高频近似方法，可以近似计算反射面上的电流分布。FEKO 支持 MLFMM 与 PO 的直接混合，可选择耦合与去耦合是否考虑 PO 区域对 MLFMM 区域的影响。

3）几何光学方法（RL-GO）：GO 同样是高频近似方法，相比 PO 方法 GO 能够考虑多次反射。FEKO 的 RL-GO 方法也称弹跳射线方法。

本节以一个偏馈反射面天线（见图 5-99）为案例，介绍 FEKO 的多种方法在反射面天线分析中的应用。

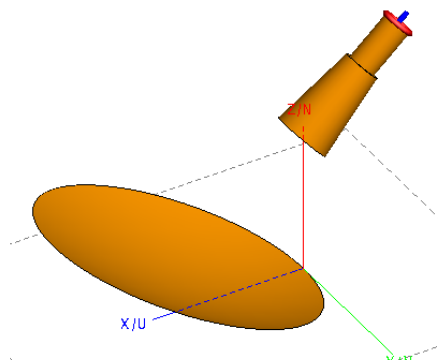


图 5-99　偏馈反射面天线的全模型示意图

计算方法描述具体见表 5-4。

表 5-4　偏馈反射面天线方法说明

类别	方法选择			应用	说明
	馈源（圆波导）	反射面	耦合		
全模型	MLFMM	MLFMM		✓	
	MLFMM	PO			反射面网格必须小于 0.3 个波长
	MLFMM	LEPO		✓	反射面可以采用较粗的网格
	MoM	PO	去耦		反射面网格必须小于 0.3 个波长
	MoM	LEPO	去耦	✓	反射面可以采用较粗的网格
天线等效源生成	MoM			✓	一个工程，可以直接生成口面近场源和远场等效源
	MLFMM				
近场源等效法	Aperture Source	MLFMM			
	Aperture Source	PO			反射面网格必须小于 0.3 个波长
	Aperture Source	LEPO		✓	反射面可以采用较粗的网格
远场源等效法 1	Spherical mode source(*.sph)	MLFMM		✓	
	Spherical mode source(*.sph)	PO			反射面网格必须小于 0.3 个波长
	Spherical mode source(*.sph)	LEPO			反射面可以采用较粗的网格
	Spherical mode source(*.sph)	GO		✓	反射面可以采用较粗的网格
远场源等效法 2	Radiation Pattern Source(*.ffe)	MLFMM			
	Radiation Pattern Source(*.ffe)	PO			反射面网格必须小于 0.3 个波长
	Radiation Pattern Source(*.ffe)	LEPO		✓	反射面可以采用较粗的网格
	Radiation Pattern Source(*.ffe)	GO			反射面可以采用较粗的网格

采用 GO 方法计算类似的辐射问题，对于馈源，建议采用远场等效源的方式，即远场方向图点源等效和球面模式等效源。

对于反射面天线，FEKO 可以采用的方法很多，可以根据问题的规模和计算时间的要求等，灵活选择计算方法。

等效源法图示，如图 5-100 所示。

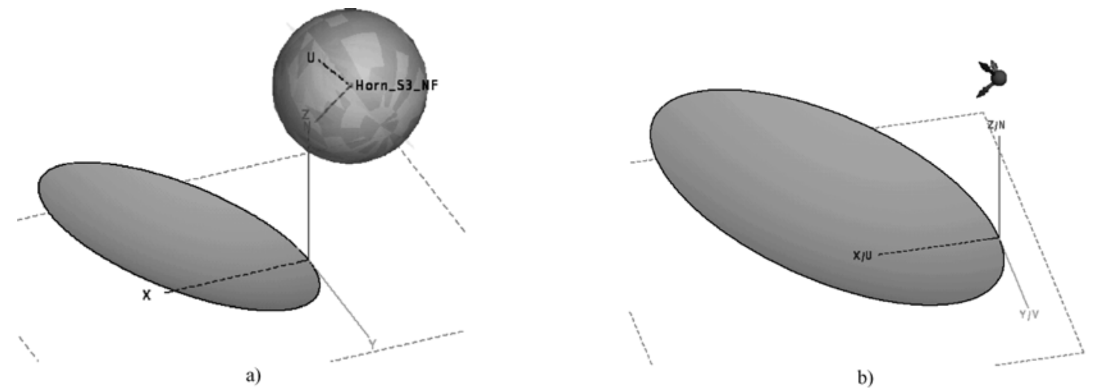


图 5-100　等效源法图示

a) 口面近场等效源计算模型　b) 远场等效源计算模型

下面采用多种方法计算该偏馈反射面的 3D 辐射方向图，比较不同计算方法的结果。

5.1 全模型仿真实现

1. MLFMM方法

启动 CADFEKO，新建一个工程“Offset_Reflector_MLFMM.cfx”。

（1）定义长度单位

在“Home”菜单中单击“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Inches(in)”单选按钮，如图 5-101 所示。默认单位为 m（米）。

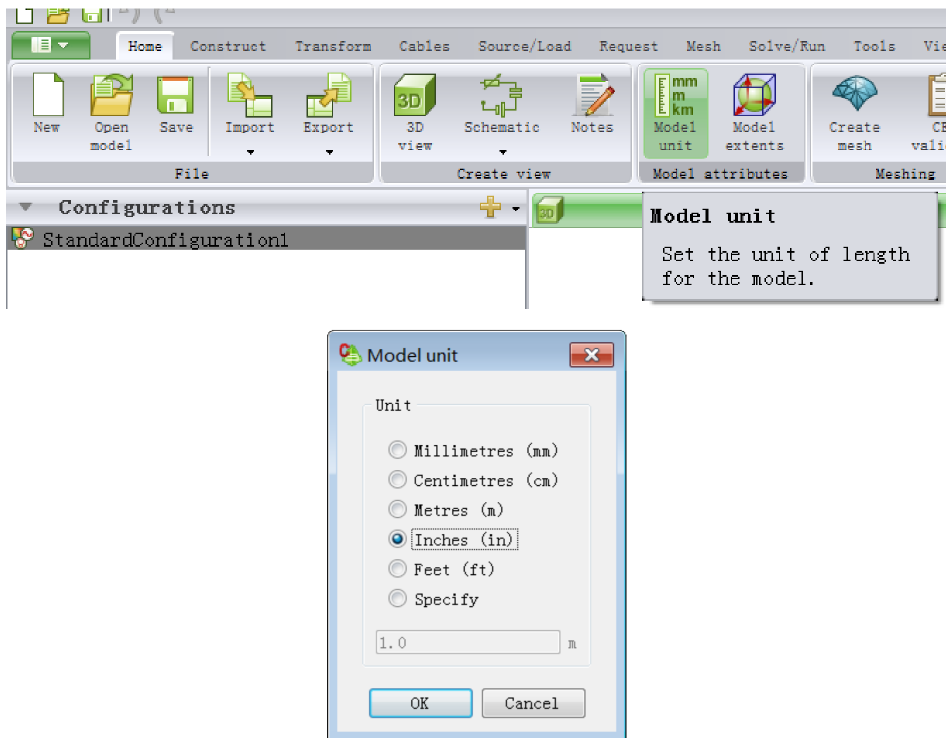


图 5-101 单位设置

（2）定义变量

在 CADFEKO 中，在左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=6.25e9。

长度缩放系数：sc = 0.0254。

工作波长：lam = c0/freq/sc。

喇叭天线的底部半径：Horn_a=0.51*lam。

喇叭天线的高度：Horn_h=3.05*lam。

Horn_b_0=0.65*lam。

Horn_b=1.0*lam。

TE11 模的波导波长：lamc_TE11=3.41*Horn_a。

TE11 模式的截止波长：lamg_TE11=lam/sqrt(1−(lam/lamc_TE11)^2)。

Horn_l=1.5*lamg_TE11。

反射面天线的焦距 F=10。

H=0。

抛物面在 x 轴的投影长度：D=18。

Rp=1.1*(H+D)。

Hp=Rp^2/(4*F)。

相位中心：phs_center=−lam/(sqrt(2)*12)。

喇叭轴线与 Z 轴的夹角（弧度）：psi_C= 2*arctan((D/2 + H)/(2*F))。

反射面剖分尺寸：tL0=lam/6.5。

波导喇叭馈电端口剖分尺寸：tL1=lam/20，如图 5−102 所示。

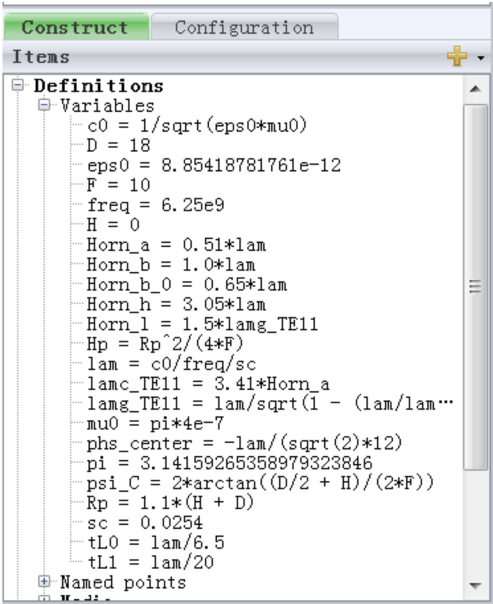


图 5−102 变量定义

（3）定义关键点“Horn_S3”

单击“Construct”菜单中的“Named Point”按钮，弹出“Create named point”对话框，如图 5−103 所示，进行如下设置。

Name: Horn_S3。

Point:

X: -phs_center*sin(psi_C)。

Y: 0。

Z: phs_center*cos(psi_C)+F。

然后单击“Create”按钮。

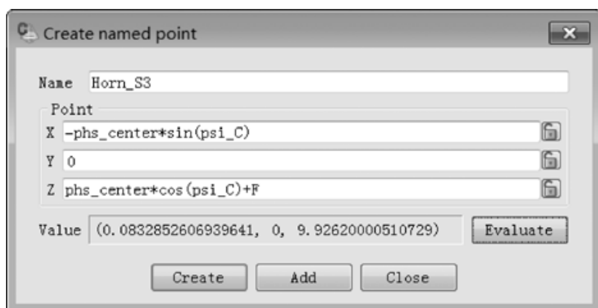


图 5-103　定义关键点

（4）定义工作平面“Focus”

在 CADFEKO 中，在左侧的树形浏览器中，选中“Workplanes”结点，单击鼠标右键，选择“Add workplane F9”选项，或直接按〈F9〉键，弹出“Create workplane”对话框。此时把光标定在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击上一步定义的关键点“Horn_S3”，接着在对话框中进行如下设置。

U vector：(X: −cos(psi_C); Y: 0.0； Z： −sin(psi_C))。

V vector：(X: 0.0; Y: 1.0; Z: 0.0)。

然后，在“Label”文本框中输入“Focus”，最后单击“Create”按钮，如图 5-104 所示。

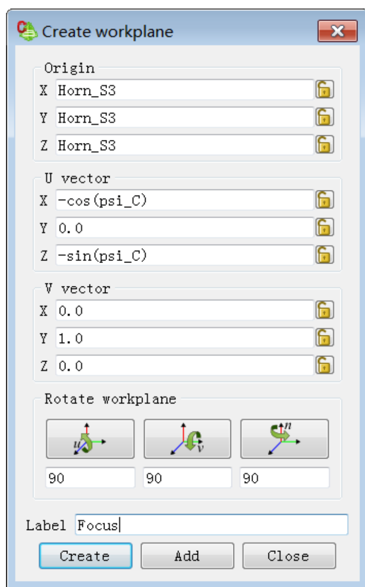


图 5-104　定义工作平面

（5）模型建立

馈源喇叭天线模型建立：单击“Construct”菜单，单击“Polyline”按钮，弹出“Create polyline”对话框，如图 5-105 所示，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Corner1：（U:0.0, V: 0.0, N: −Horn_l−Horn_h）。

Corner2：（U: Horn_a, V:0.0, N: −Horn_l−Horn_h）。

单击“Add”按钮。

Corner3：（U: Horn_a, V: 0.0, N: −Horn_h）。

单击“Add”按钮。

Corner4：（U: Horn_b_0, V: 0.0, N: −Horn_h）。

单击“Add”按钮。

Corner5：（U:Horn_b, V: 0.0, N: 0.0）。

在“Workplane”选项卡中：

把光标定在“Origin”位置，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击左侧的树形浏览器“Workplanes”结点下的工作平面“Focus”。

然后在“Label”文本框中输入“Curve”，单击“Create”按钮。

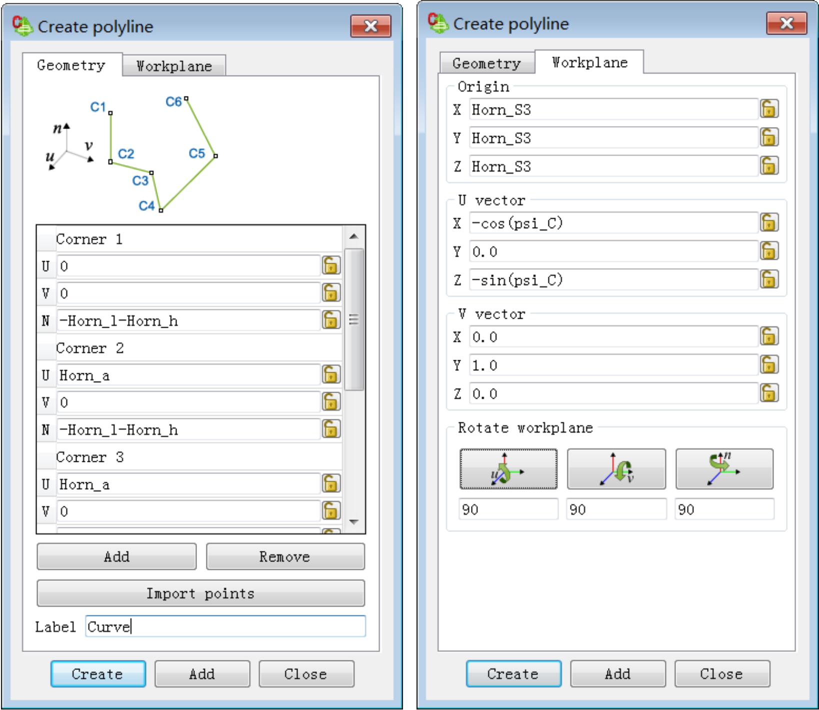


图 5-105　定义天线母线坐标点

在左侧树形浏览器的“Geometry”结点中，选中新建的线模型“curve”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Spin”选项，弹出“Spin geometry”对话框，进行如下设置。

把光标定位在“Origin”位置，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击在左侧树形浏览器“Name points”中定义的关键点“Horn_S3”。

Axis direction：

U：sin(psi_C)。

V：0.0。

N：−cos(psi_C)。

Angle[degrees]：360。

然后单击“Create”按钮，如图 5-106 所示。

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，把新生成的模型更名为“Horn_SY”，选中该模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simplify”选项，弹出“Simplify geometry”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮。

反射面模型建立：在“Construct”中单击“Paraboloid”按钮，弹出“Create paraboloid”对话框，如图 5-107 所示，进行如下设置。

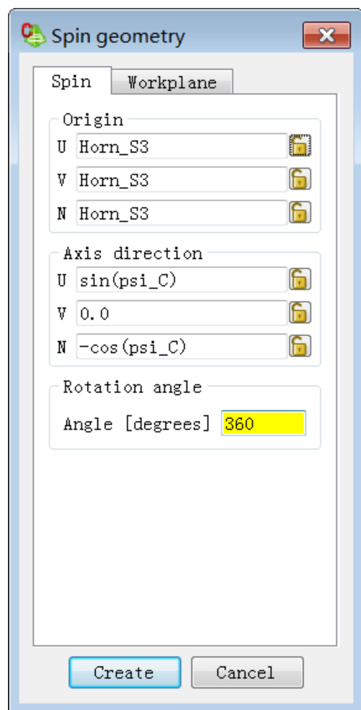


图 5-106　定义模型旋转成体

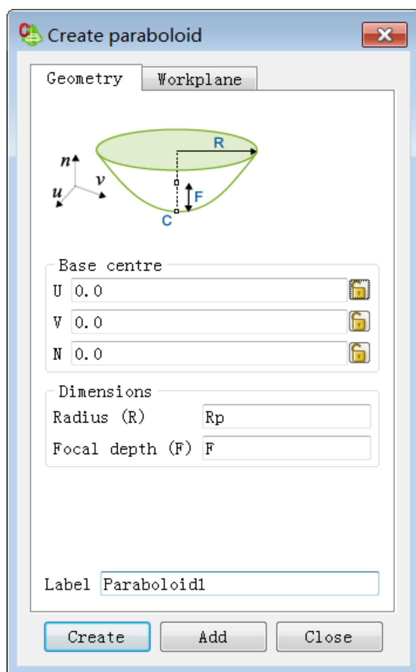


图 5-107　创建抛物面

在“Geometry”选项卡中：

Base centre：(U:0.0, V:0.0, N: 0.0)。

Radius(R)：Rp。

Focal depth(F) : F。

在“Label”文本框中输入“Paraboloid 1”，单击“Create”按钮。

在“Construct”菜单中单击“Cylinder”按钮，弹出“Create cylinder”对话框，如图 5-108 所示，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Base center：(U:0.0, V:0.0, N:0.0)。

Radius (R): D/2。

Height (H): Hp。

在“Workplane”选项卡中：

Origin: (X: D/2+H, Y:0.0, Z:−1)。

U vector: (X:1.0, Y:0.0, Z: 0.0)。

V vector: (X:0.0, Y:1.0, Z: 0.0)。

在“Label”文本框中输入“Cylinder 1”，单击“Create”按钮。

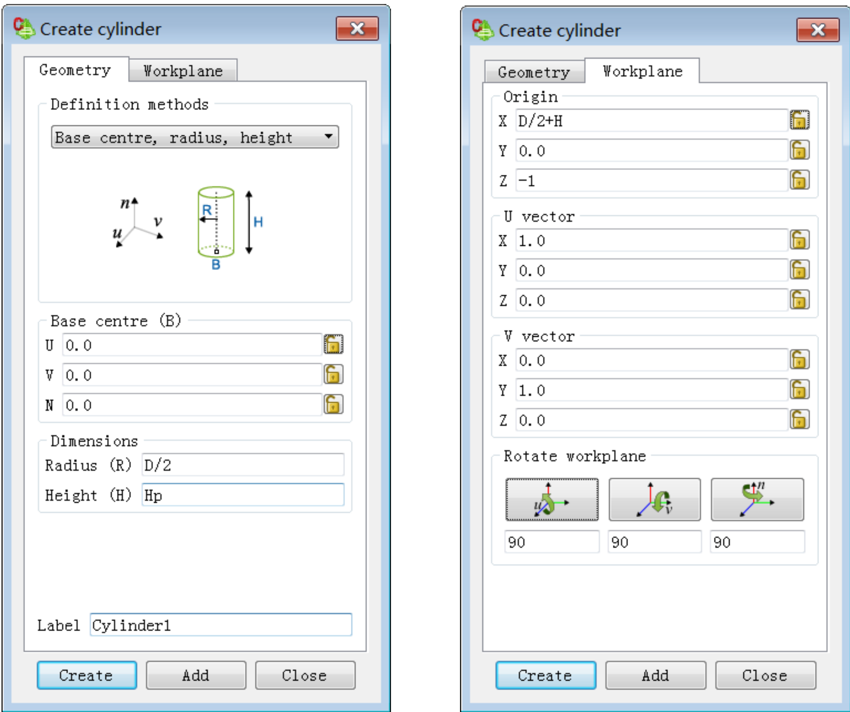


图 5-108　创建圆柱体

在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，同时选中模型“Cylinder1”和“Paraboloid1”，单击鼠标右键，选择“Intersection”选项，把新生成的模型更名为“Offset_Reflector”。

（6）设定对称与端口

单击“Solve/Run”菜单中的“Symmetry”按钮，弹出“Symmetry definition”对话框，如图 5-109 所示，进行如下设置。

X=0　plane: No symmetry。

Y=0　plane: Geometric symmetry。

Z=0　plane: No symmetry。

然后单击“OK”按钮。

在 3D 视图区域，把模型移动并缩放到适合的角度，单击鼠标左键自动切换到面选模式，选中馈源喇叭天线“Horn_SY”的最底部面，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Waveguide port”选项，如图 5-110 所示，弹出“Create waveguide port（geometry）”对话框，如图 5-111

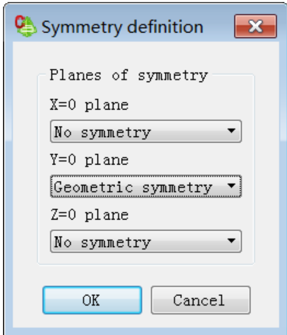


图 5-109　定义对称面（几何对称）

所示。

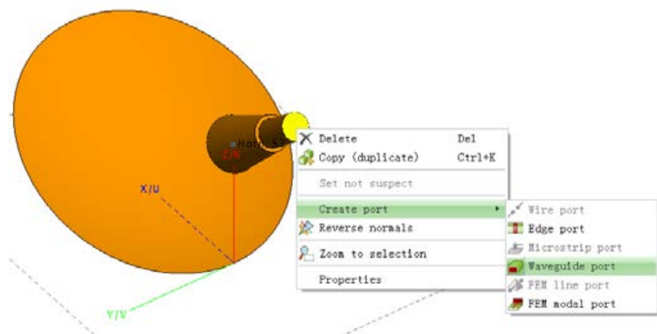


图 5-110　定义波导端口 1

不勾选“Propagation direction opposite to normal”复选框，目的是要使得该面添加的波导信号是向里传播的，即红色箭头朝里。在“Label”文本框中输入“Port1”，单击“Create”按钮。

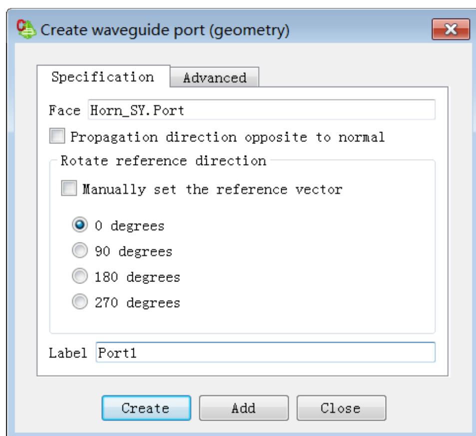


图 5-111　定义波导端口 2

在 3D 视图区域中进入面选模式，选中馈源喇叭天线“Horn_SY”的最底部的面，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

进入“Meshing”选项卡：

勾选：Local mesh size。

Mesh size: tL1。

单击“OK”按钮。

（7）电参数设置

计算方法设置：单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，进行如下设置。

进入“MLFMM/ACA”选项卡：

选中：Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)。

单击“OK”按钮，如图 5-112 所示。

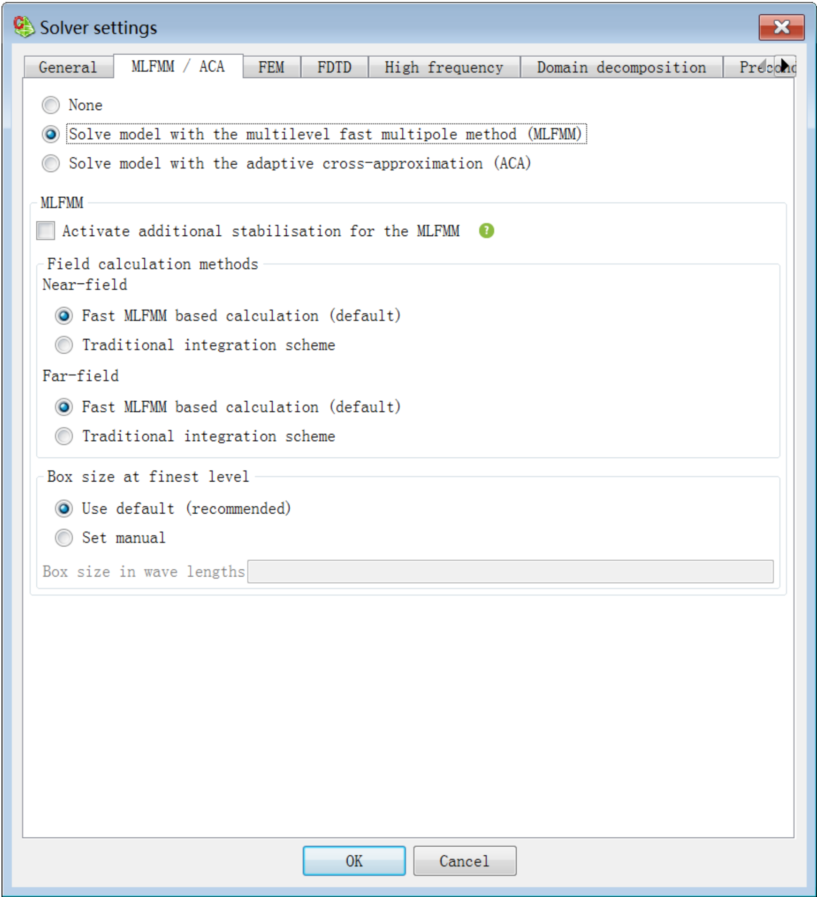


图 5-112　设置 MLFMM 计算方法

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz): freq。

单击“OK”按钮。

（8）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Waveguide source”选项，弹出“Add waveguide source”对话框，进行如下设置。

Fundamental mode：

Magnitude: 1。

Phase: 0。

Rotation: 0。

Label: WGE_0。

单击“Add”按钮，继续设置。

Magnitude: 1。

Phase: 90。

Rotation: 90。

Label: WGE_90。

单击“Create”按钮，如图 5-113 所示。

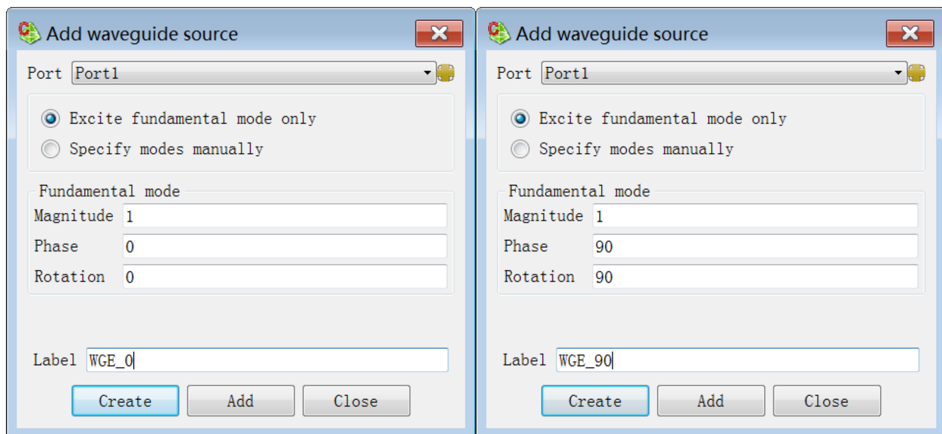


图 5-113　定义端口激励

（9）求解设置

在“Configuration specific”中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮。

修改 theta 的 Increment：0.5。

Label：ff3D。

单击“Create”按钮，如图 5-114 所示。

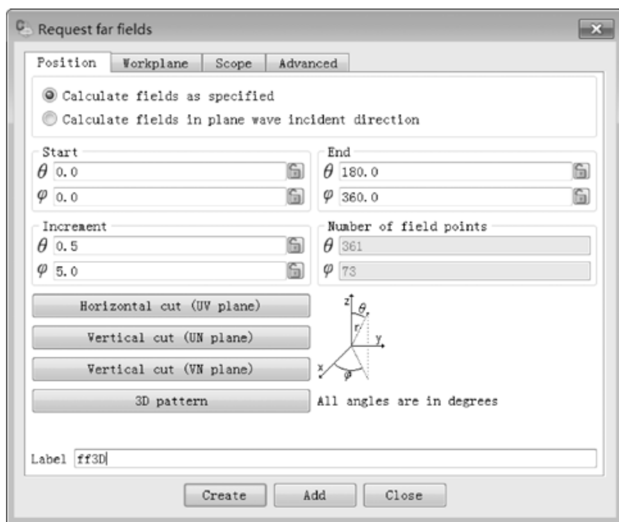


图 5-114　远场方向图求解设置

（10）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangles edge length”：tL0。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-115 所示。

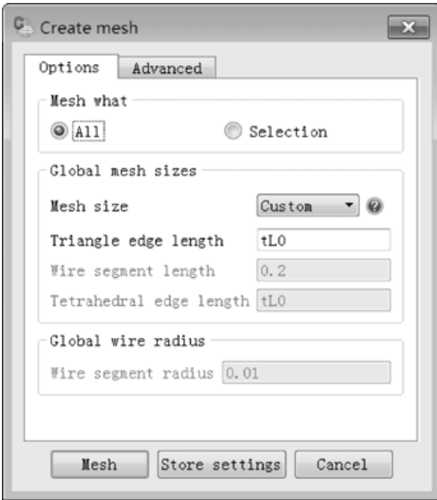


图 5-115　定义网格划分

（11）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（12）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

（13）显示 3D 结果

在“Home”菜单中，单击“Far field”→“ff3D”，在右侧控制面板中，勾选“dB”复选框。

进入“Result”菜单，单击“Grid”按钮。

进入“Display”菜单，单击“Individual range”按钮，弹出“Entity manual limits settings[ff3D]”对话框，进行如下设置。

dB scale: 选中“Specify max dynamic range”。

Dynamic range (dB): 80。

单击“OK”按钮，如图 5-116 所示。3D 辐射方向图如图 5-117 所示。

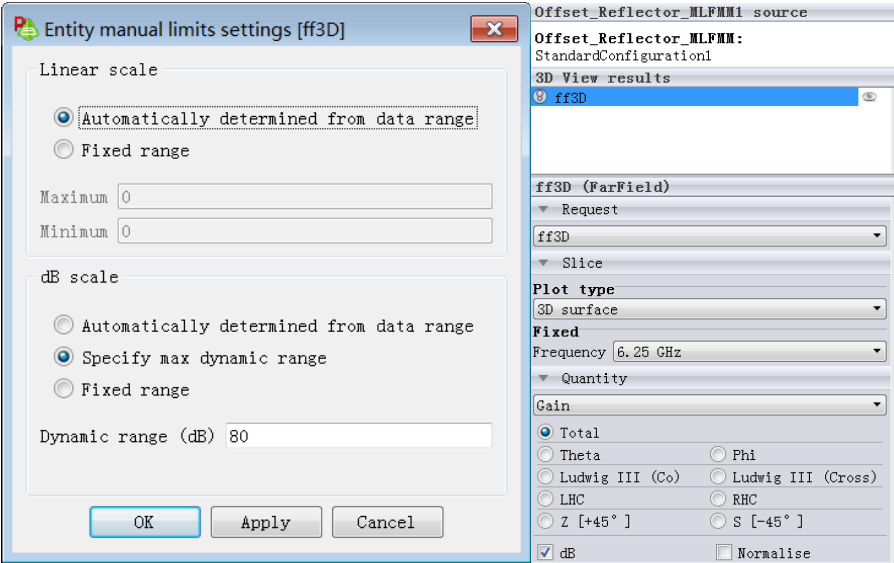


图 5-116　反射天线 MLFMM 计算 3D 方向图

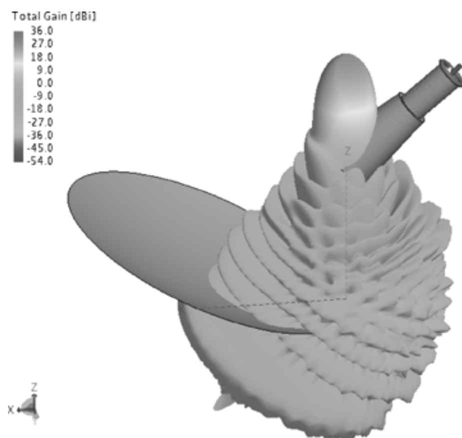


图 5-117　3D 辐射方向图显示

（14）显示 2D 结果

切换到“Home”菜单，单击“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Far field”→“ff3D”，会在直角坐标系中直接显示 Phi=0°极化平面上的 2D 增益方向图，在右侧控制面板中进行如下设置。

Independent axis (Horizontal): Theta (wrapped)。

Quantity: Gain。

勾选“dB”复选框，如图 5-118 所示。

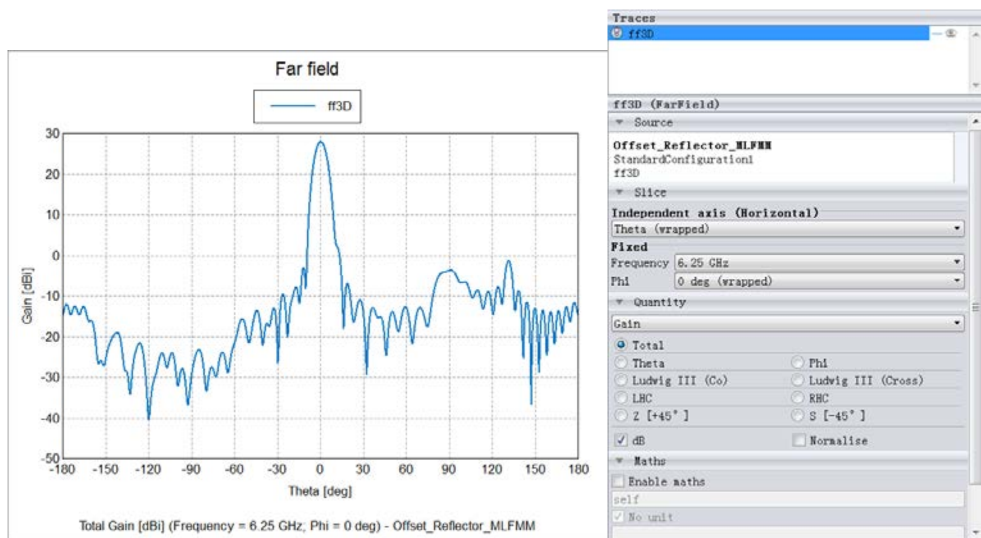


图 5-118　XOZ 平面辐射方向图

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“Offset_Reflector_MLFMM.pfs”。

2. MoM+LEPO混合法

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，另存为“Offset_Reflector_

MoM_LEPO.cfx”。

（1）求解方法设置

单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，进行如下设置。

进入“MLFMM/ACA”选项卡：

选中“None”单选按钮，单击“OK”按钮，如图 5-119 所示。

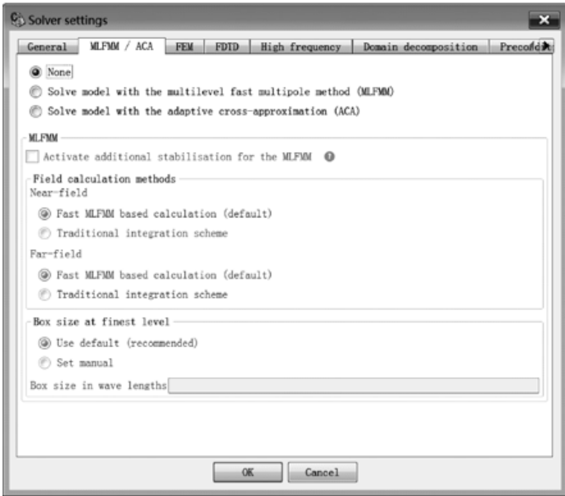


图 5-119　设置计算方法

进入“High frequency”选项卡：

确认选中“Decouple PO and MoM solutions”单选按钮，如图 5-120 所示。

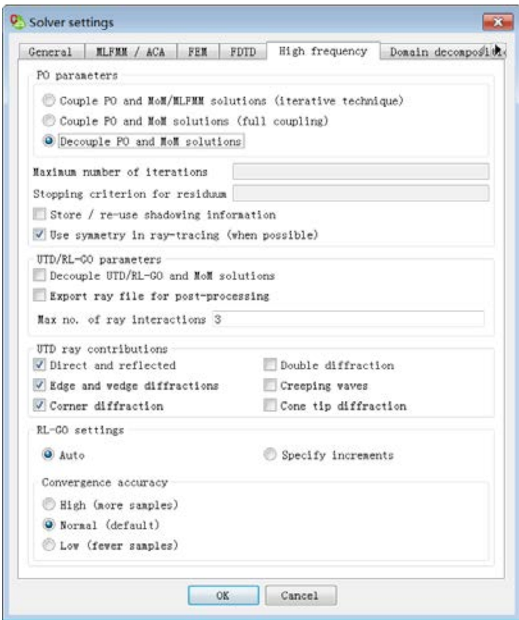


图 5-120　求解设置（高频高级设置）

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，选中“Offset_Reflector”模型，在左下角的“Details”树形浏览器中，展开“Faces”结点，选择面元“Face*”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

进入“Solution”选项卡：

选择方法：Large element PO−always illuminated。

进入“Meshing”选项卡：

勾选：Local mesh size。

Mesh size: lam/2。

单击“OK”按钮，如图 5-121 所示。

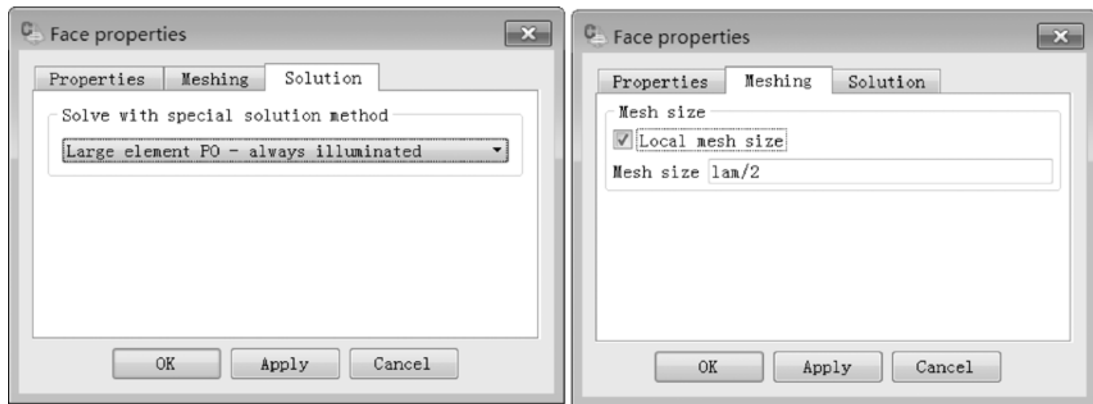


图 5-121　反射面（计算方法与网格剖分设置）

（2）网格生成

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，生成网格。

（3）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

3．MLFMM+LEPO混合法

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“Offset_Reflector_MoM_LEPO.cfx”另存为“Offset_Reflector_MLFMM_LEPO.cfx”。

（1）求解方法设置

单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，进行如下设置。

进入“MLFMM/ACA”选项卡：

选中：Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)。

单击“OK”按钮，如图 5-122 所示。

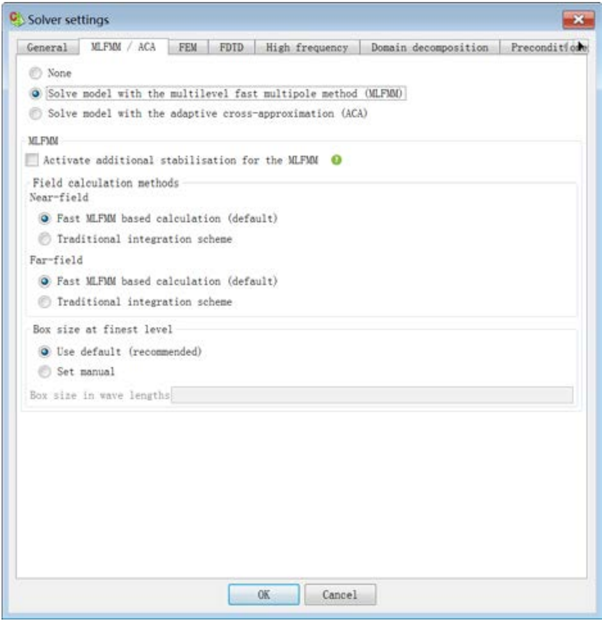


图 5-122　设置计算方法

进入"High frequency"选项卡：

确认选中了"Couple PO and MoM/MLFMM solutions（iterative technique）"单选按钮，如图 5-123 所示。

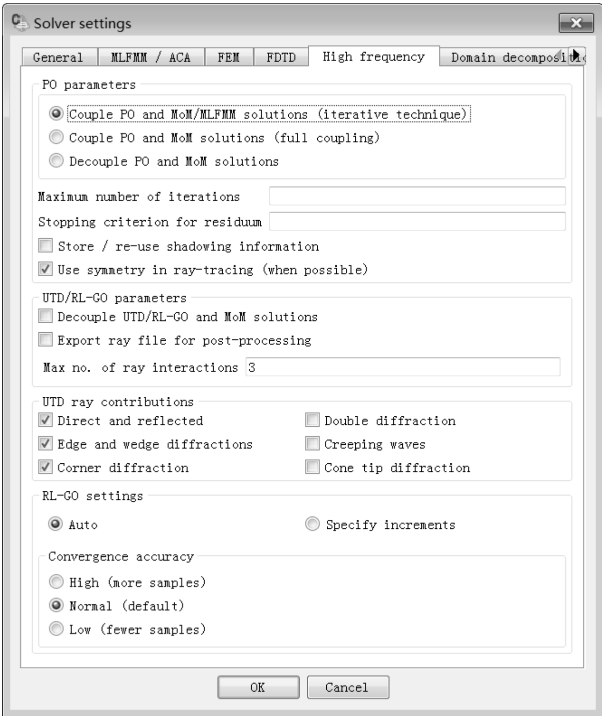


图 5-123　求解设置（高频高级设置）

（2）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（3）后处理结果显示

打开已经保存的 POSTFEKO 工程“Offset_Reflector_MLFMM.pfs”的后处理界面，单击“Add model”按钮，同时读入“Offset_Reflector_MoM_LEPO.bof”和“Offset_Reflector_MLFMM_LEPO.bof”。

在“Home”菜单中，单击“Far field”中新导入两个工程结果文件中的“ff3D”，在右侧面板中，修改设置如下。

Independent axis (Horizontal) 修改为：Angle(wrapped)。

勾选：dB。

2D 结果显示如图 5-124 所示。

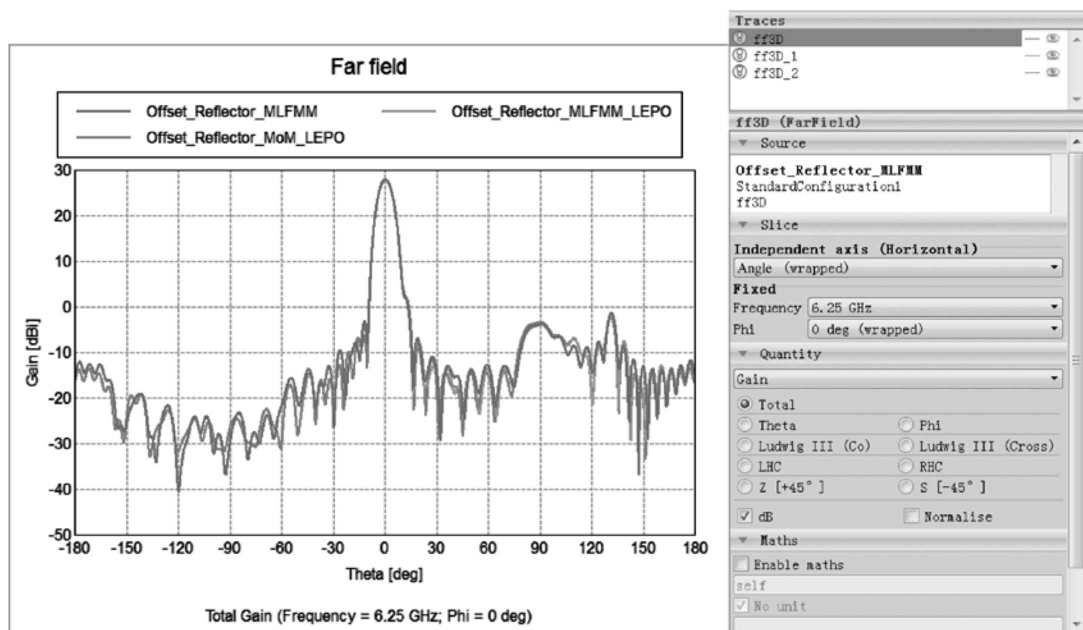


图 5-124　2D 结果显示（对比 MLFMM、MoM+LEPO 与 MLFMM+LEPO）

5.5.2 等效技术的实现

1. 天线模型——等效源的生成

切回到 CADFEKO，单击“Home”菜单中的“New”按钮，新建一个工程“Dual_mode_horn.cfx”。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Inches(in)”单选按钮，如图 5-125 所示。

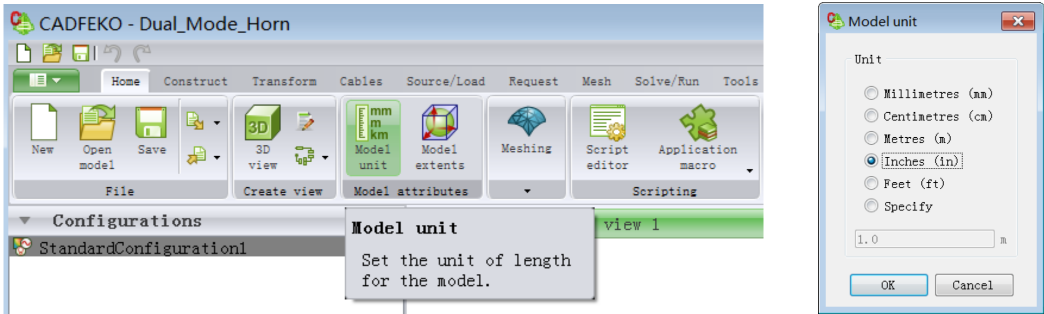


图 5-125　长度单位设置

（2）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=6.25e9。

长度缩放系数：sc = 0.0254。

工作波长：lam = c0/freq/sc。

喇叭天线的底部半径：a=0.51*lam。

喇叭天线的高度：L=3.05*lam。

b0=0.65*lam。

b=1.0*lam。

TE11 模式的截止波长：lam_w=lam/sqrt(1−(lam/(3.41*a))^2)。

相位中心：n_phs=−lam/(sqrt(2)*12)。

w_l=1.5*lam_w。

喇叭剖分尺寸：tL0=lam/8。

dl=−w_L−L−n_phs。

波导喇叭馈电端口剖分尺寸：tL1=lam/20，如图 5-126 所示。

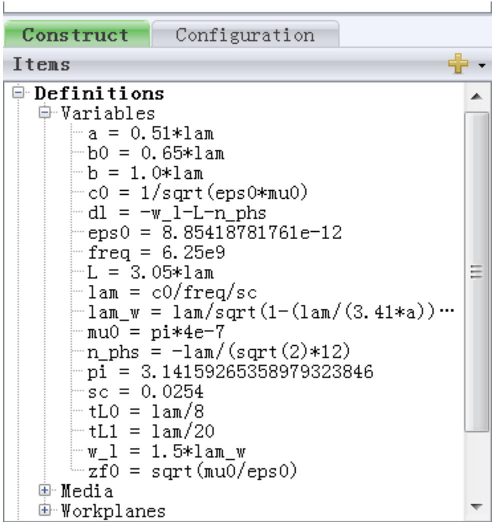


图 5-126　定义变量

（3）模型建立

单击“Construct”菜单中的“Cylinder”按钮，弹出“Create cylinder”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Base centre(B)：（U:0.0, V: 0.0, N: dL）。

Radius(R): a。

Height (H): w_L。

Label: waveguide。

单击“Create”按钮。

单击“Construct”菜单中的“Cone”按钮，弹出“Create cone”对话框进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Base centre(B)：（U:0.0, V: 0.0, N: −L−n_phs）。

Base radius (Rb): b0。

Height (H): L。

Top radius(Rt): b。

Label： Cone。

单击“Create”按钮，如图 5-127 所示。

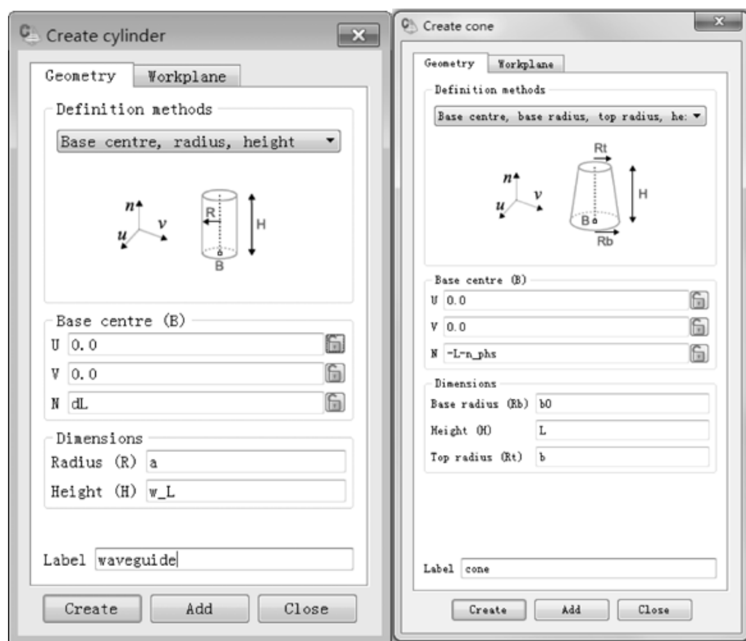


图 5-127　创建波导与开口喇叭

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点。同时选中新建立的模型“waveguide”和“Cone”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“Horn”，选中“Horn”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“simplify”，弹出“Simplify geometry”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，把几何模型中间相连的冗余面自动删除。

在 3D 视图中，单击几何模型，自动切换到“面选模式”，选中喇叭天线口面的面元，单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除该面。

在 3D 视图中，单击几何模型，自动切换到“面选模式”，选中喇叭天线最底部的端口面元，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wave guide port”选项，弹出“Create waveguide port（geometry)”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮（要确保端口面的红色箭头朝向喇叭内部），如图 5-128 所示。

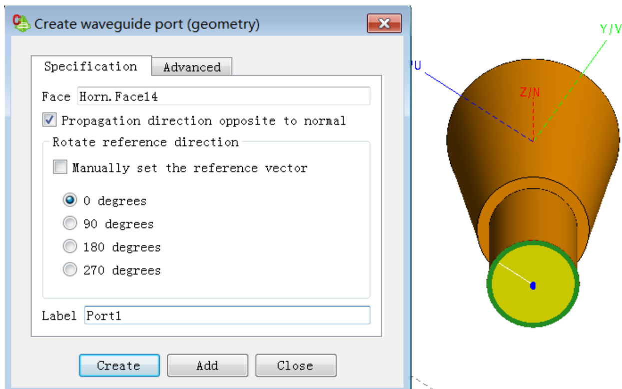


图 5-128 创建波导端口

在 3D 视图中，单击几何模型，自动切换到“面选模式”，选中喇叭天线最底部的端口面元，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

勾选：Local mesh size。

Mesh size: tL1。

单击“OK”按钮，如图 5-129 所示。

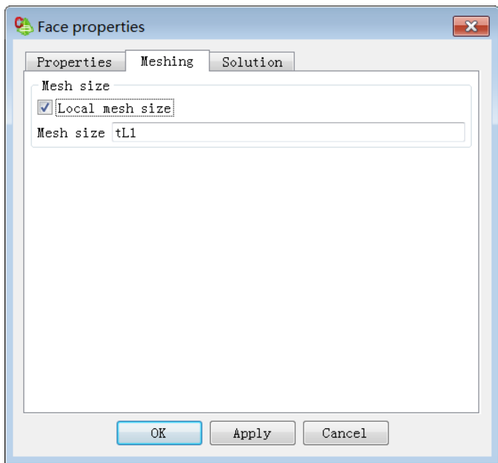


图 5-129 定义波导端口面元的网格划分标准

（4）电参数设置

计算方法设置：单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，进行如下设置。

进入“MLFMM/ACA”选项卡：

选中：Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)。

单击“OK”按钮，如图 5-130 所示。

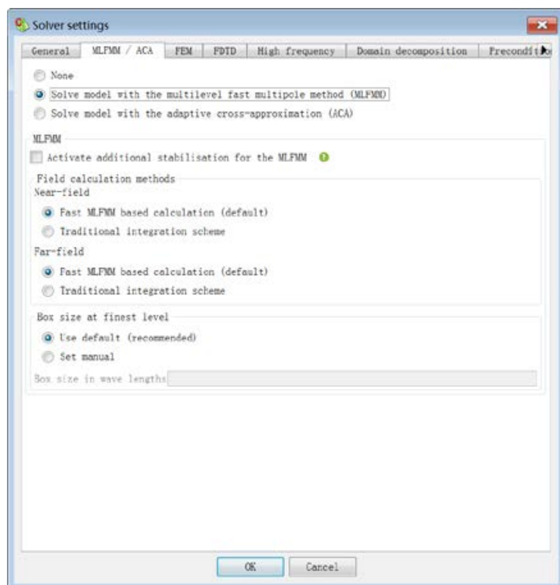


图 5-130　设置 MLFMM 计算方法

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz): freq。

单击“OK”按钮。

（5）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Waveguide source”选项，弹出“Add waveguide source”对话框，进行如下设置。

Fundamental mode：

Magnitude: 1。

Phase: 0。

Rotation: 0。

Label: WGE_0。

单击“Add”按钮，继续设置。

Magnitude: 1。

Phase: 90。

Rotation: 90。

Label: WGE_90。

单击“Create”按钮，如图 5-131 所示。

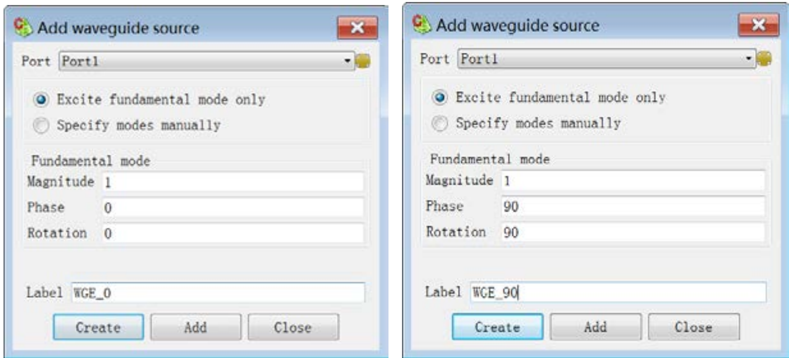


图 5-131　定义波导激励

（6）远场求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

在“Position”选项卡中：

单击“3D pattern”按钮。

修改 theta 的 Increment：2.5。

修改 Phi 的 Increment：5.0。

进入“Advanced”选项卡：

勾选：Export fields to ASCII file (*.ffe)，会生成远场方向图文件*.ffe。

勾选：Calculate Spherical expansion mode coefficients。

勾选：Export Spherical expansion coefficients to ASCII file，会生成球面模式展开系数文件*.sph。

返回“Position”选项卡：

Label：ff3D。

单击“Create”按钮，如图 5-132 所示。

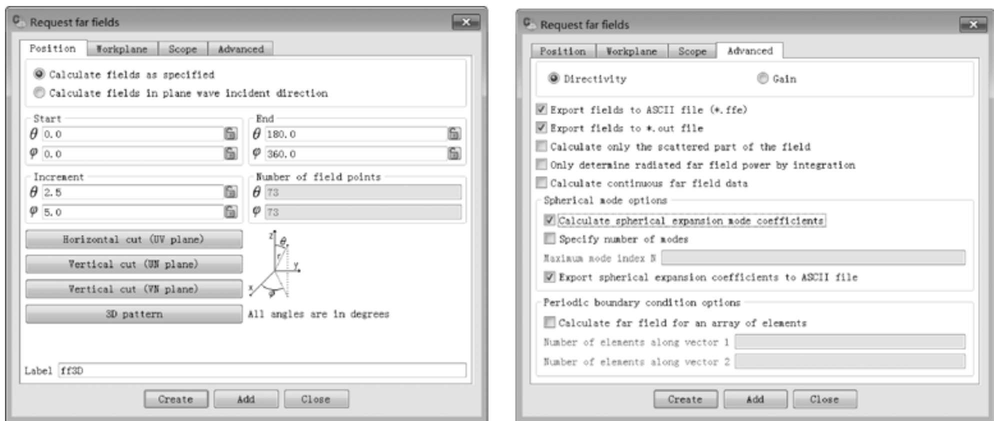


图 5-132　远场方向图求解与导出设置

（7）口面场求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Near

fields”选项，弹出“Request near fields”对话框，进行如下设置。

在“Position”选项卡中：

Definition methods：Spherical。

Start：(r:5.0; θ: 0.0, φ: 0.0)。

End：(r:5.0; θ: 165.0, φ: 360.0)。

修改采样方式为：Specify increments。

修改 Theta 的 Increment 为：2。

修改 Phi 的 Increment 为：4。

不勾选：Sample on edges。

Label：NF_Aperture。

进入“Workplane”选项卡：

修改 Origin 为：(X:0.0; Y:0.0; Z: −4)。

进入“Advanced”选项卡：

勾选：Export fields to ASCII file (*.efe, *.hfe)。

单击“Create”按钮，如图 5-133 所示。

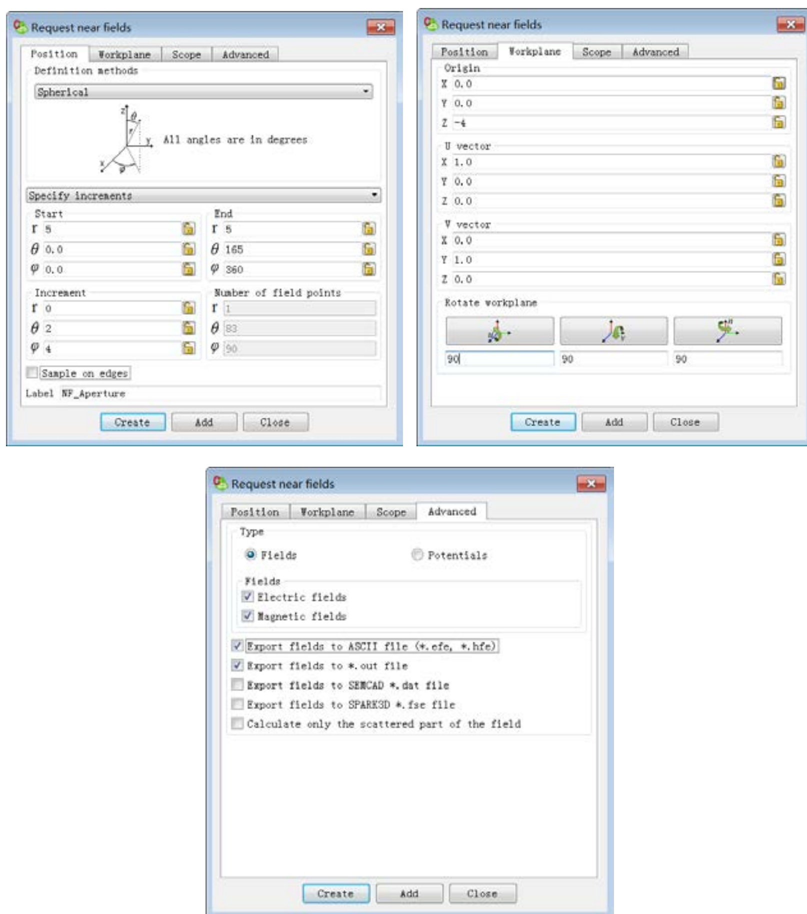


图 5-133　球坐标系辐射近场求解与导出设置

（8）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangle edge length”：tL0。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-134 所示。

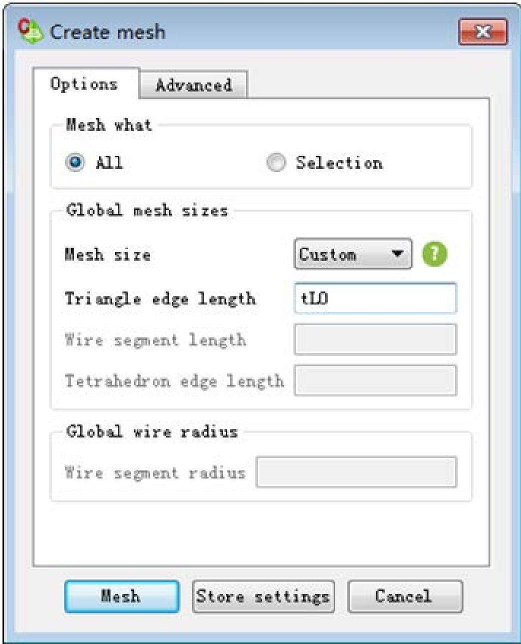


图 5-134　生成网格

（9）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。计算完成后，会自动生成远场辐射源数据文件“Dual_mode_horn_ff3D.ffe”，远场球面波系数展开文件“Dual_mode_horn_ff3D.sph”以及口面近场数据源文件“Dual_mode_horn_NF_Aperture.efe，Dual_mode_horn_NF_Aperture.hfe”。

2．口面近场等效法+反射面（大面元物理光学法）

本节模型沿用 5.5.1 节中 MoM 与 LEPO 的计算工程。在 CADFEKO 中，单击“Home”菜单中的“Open model”按钮，打开“Offset_Reflector_MoM_LEPO.cfx”，单击起始菜单中的“Save as”按钮，另存为“Offset_reflector_Aperture_Source_LEPO.cfx”。

（1）定义变量“nf_Offset=4”

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，选中“Horn_SY”并单击鼠标右键，选择“Delete”选项。

在左侧的树形浏览器中，展开“Named Points”结点，选中“Horn_S3”并单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除该关键点。

在左侧的树形浏览器中，双击“Named Points”结点，弹出“Create named points”对话

框，进行如下设置。

Name: Horn_S3_NF。

X：(−phs_center−nf_Offset)*sin(psi_C)。

Y：0.0。

Z：(phs_center+nf_offset)*cos(psi_C)+F。

单击“Create”按钮，如图 5-135 所示。

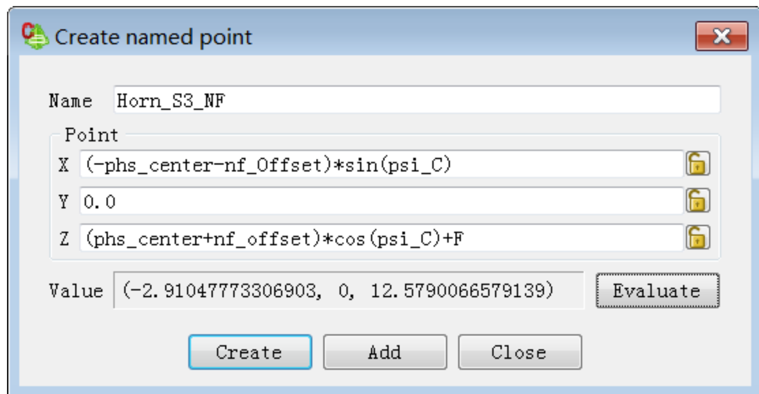


图 5-135　定义关键点“Horn_S3_NF”

（2）口面近场激励源设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，展开“Global”结点，选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Near field”选项，如图 5-136 所示，弹出“Add near field”对话框。单击“Field data”选项卡后面的加号，选择“Define near field data file structure”，进入近场定义对话框“Define near field data file structure”。

依次单击两个“Browse”按钮，读入相应的近场电场文件“Dual_Mode_Horn_NF_Aperture.efe”和近场磁场文件“Dual_Mode_Horn_NF_Aperture.hfe”。

Coordinate system 修正为：Spherical。

不勾选：Also sample along edges。

Radius (R)：5。

Number of points along theta：83。

Number of points along phi：90。

Start reading from line number：1。

进入“Workplane”选项卡：

将光标定在“Origin”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击左侧的树形浏览器中的“Named Points”结点中的关键点“Horn_S3_NF”。

U vector：（X：cos(psi_C); Y：0.0; Z：sin(psi_C)）。

V vector：（X：0.0; Y：−1; Z：0.0）。

单击“Create”按钮，如图 5-137 所示。

这样在“Definitions”中创建了“Field data”和“NearFieldData1”。

在“Add near field source”中的“Field data”中选择定义好的“NearFieldData1”。

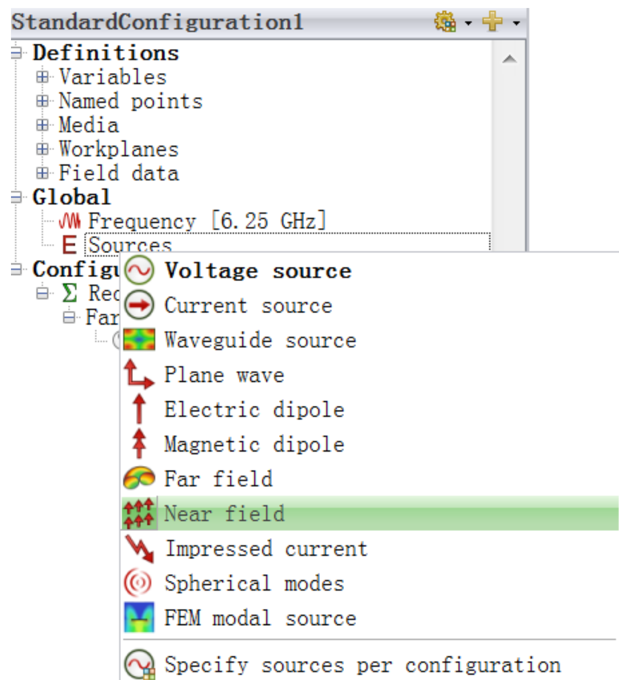


图 5-136 定义口面近场激励

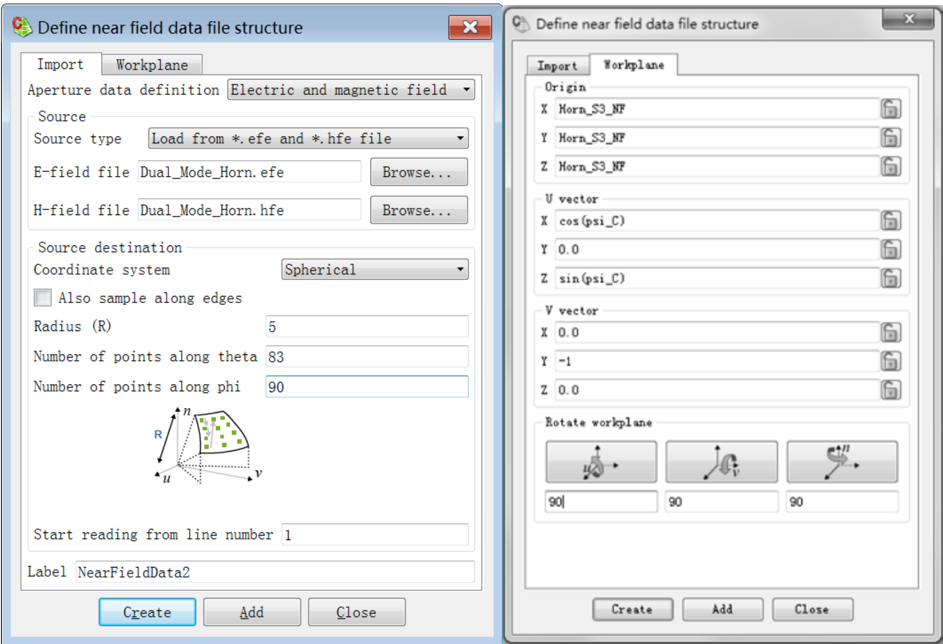


图 5-137 口面近场源设置

（3）网格生成

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮生成网格，如图 5-138 所示。



图 5-138　网格划分

（4）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

3. 球面模式远场等效法+反射面（MLFMM）

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“Offset_reflector_Aperture_Source_LEPO.cfx”另存为“Offset_reflector_sperical_Source_MLFMM.cfx”。

（1）修改激励源

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，展开“Global”结点中的“Sources”结点，选中“NearFieldSource1”，单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除所有的激励源。

选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Spherical modes”选项，弹出“Add spherical modes source”对话框，进行如下设置。

单击“Field data”选项卡后面的加号，选择“Import spherical modes from file”。

单击“Browse”按钮，读入球面模式系数文件“Dual_Mode_Horn_ff3D.sph”。

进入“Workplane”选项卡，选择默认格式。单击“Add”按钮，即在“Definitions”中的“Field data”中生成球面波数据“SphericalModesData1”，如图 5-139 所示。

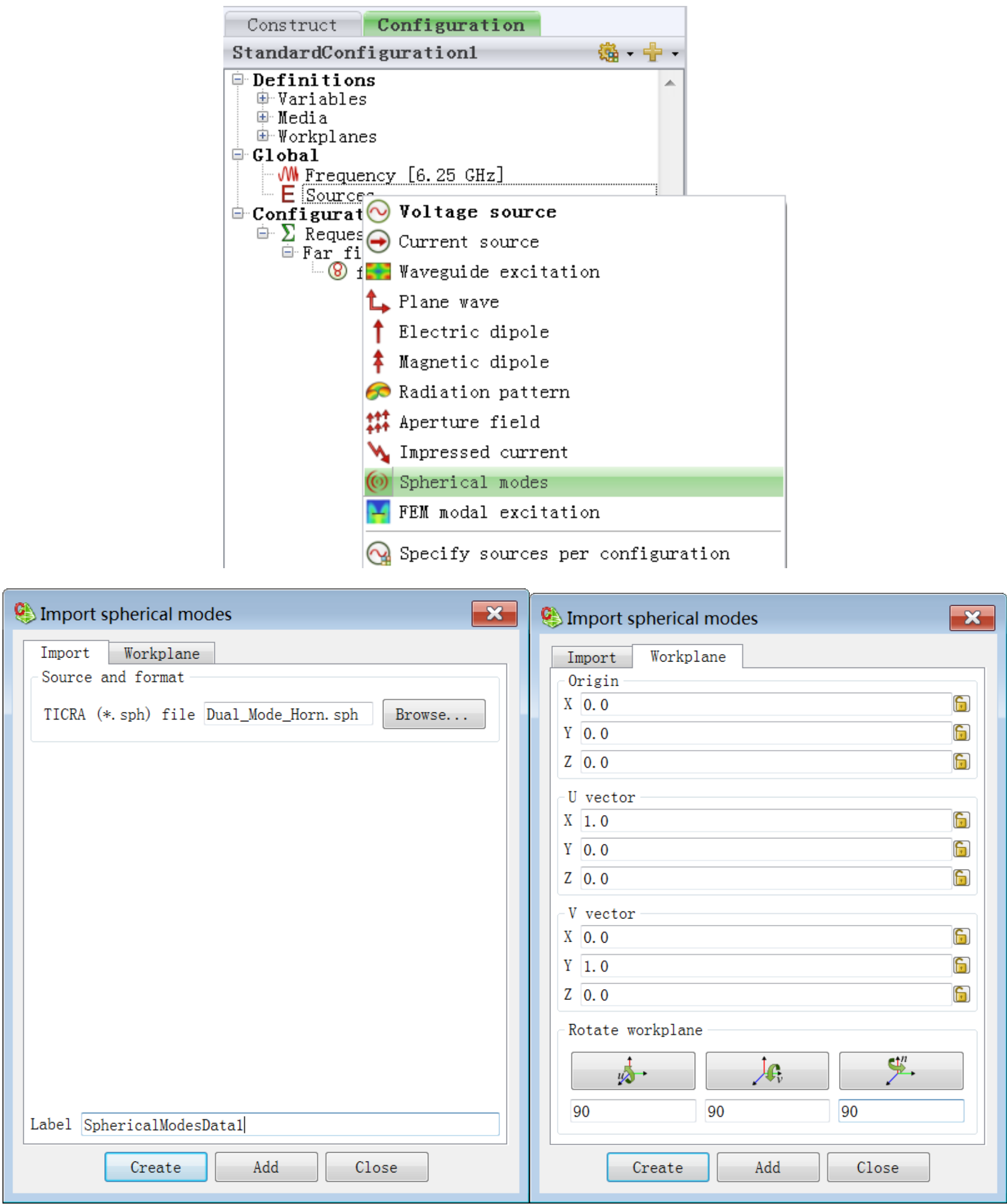


图 5-139　定义球面模式远场等效源的 Field data

随后在“Add spherical modes source”对话框的“Field data”中选择“SphericalModesData1”，并在“Workplane”选项卡中进行如下设置。

在“Origin”区域定义：（X：0.0，Y：0.0；Z：F）。

U vector：（X：cos(psi_C); Y：0.0; Z：sin(psi_C)）。

V vector：（X：0.0; Y：−1.0; Z：0.0）。

Label：SphericalModesSource1。

单击“Create”按钮，如图 5-140 所示。

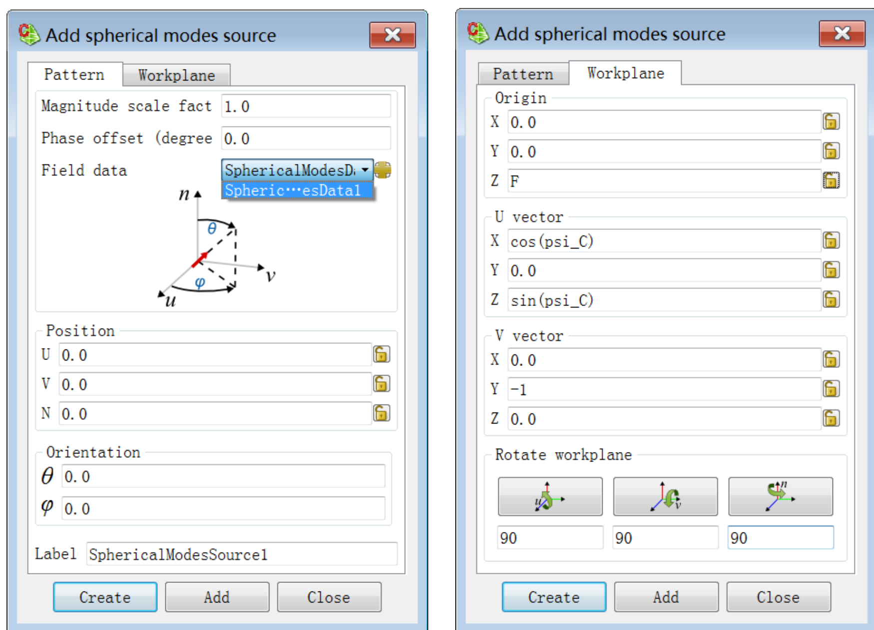


图 5-140 定义球面模式远场等效源

（2）求解方法修正

在左侧的树形浏览器中，由“Configuration”切换到“Construct”，展开“Geometry”结点，选中模型“Offset_Reflector”，展开左下角子树视图中的“faces”结点，选中“Face1”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

进入“Solution”选项卡：

Solve with special solution method 修改为：None。

进入“Meshing”选项卡：

Mesh size: tL0。

单击“OK”按钮，如图 5-141 所示。

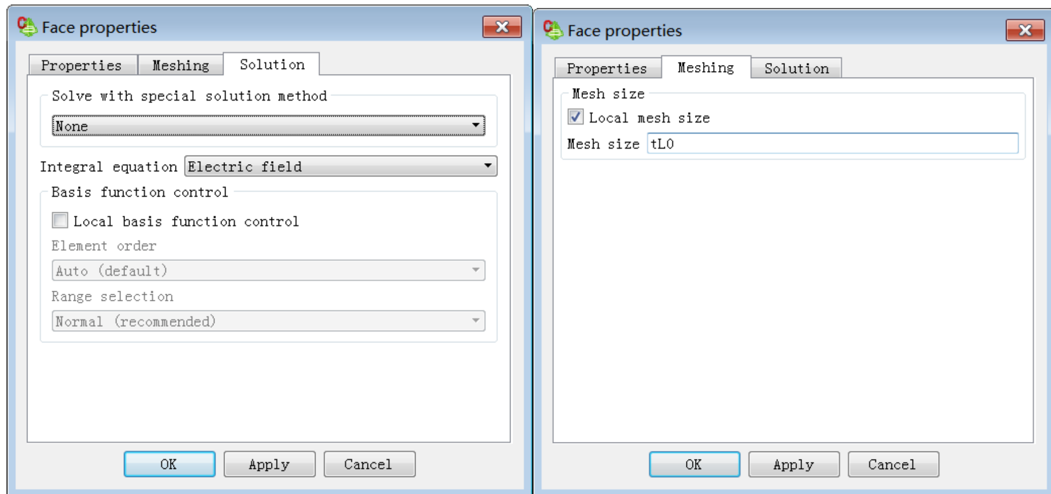


图 5-141 修改面元求解方法与网格剖分规则

（3）设置多层快速多极子求解方法

单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，进行如下设置。

进入“MLFMM/ACA”选项卡：

勾选：Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)。

单击“OK”按钮。

（4）网格生成

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮生成网格。

（5）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

4. 球面模式远场等效法+反射面（GO）

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“Offset_reflector_sperical_Source_MLFMM.cfx”另存为“Offset_reflector_sperical_Source_GO.cfx”。

（1）求解方法修正

在左侧的树形浏览器中，由“Configuration”切换到“Construct”，展开“Geometry”结点，选中模型“Offset_Reflector”，展开左下角子树视图中的“faces”结点，选中“Face1”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

进入“Solution”选项卡：

Solve with special solution method 修改为：Ray lanching-geometrical optics(RL-GO)。

进入“Meshing”选项卡：

Mesh size: lam/2。

单击“OK”按钮，如图 5-142 所示。

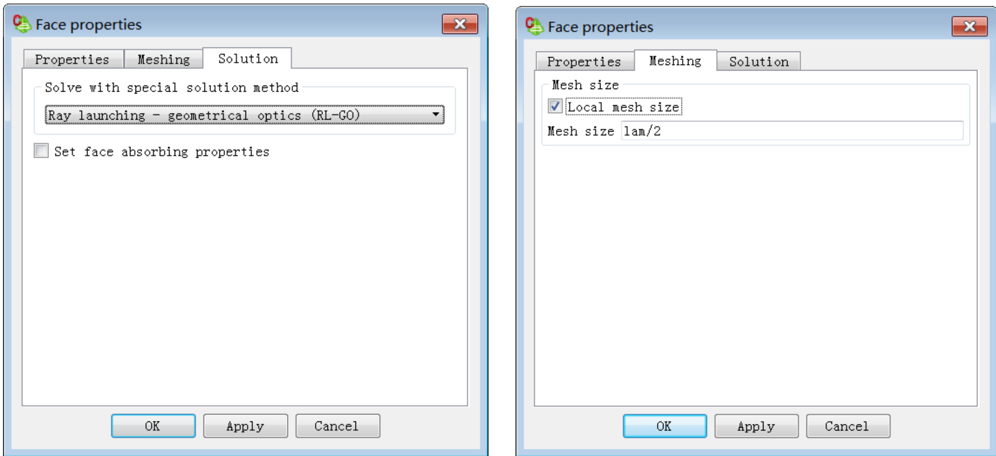


图 5-142　修改面元求解方法与网格剖分规则

在“Solve/Run”菜单中单击“Solver settings”按钮，在弹出的“Solver settings”对话框的“MLFMM/ACA”选项卡中勾选“None”复选框。

（2）网格生成

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮生成网格。

（3）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

5. 远场点源等效法+反射面（LEPO）

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“Offset_reflector_sperical_Source_GO.cfx”另存为“Offset_reflector_ffe_source_LEPO.cfx”。

（1）求解方法修正

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，选中“Offset_Reflector”模型，在左下角的“Details”树形浏览器中，展开“Faces”结点，选择面元“Face1”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

进入“Solution”选项卡：

选择方法：Large element PO–always illuminated。

进入“Meshing”选项卡：

勾选：Local mesh size。

Mesh size: lam/2。

单击“OK”按钮，如图 5-143 所示。

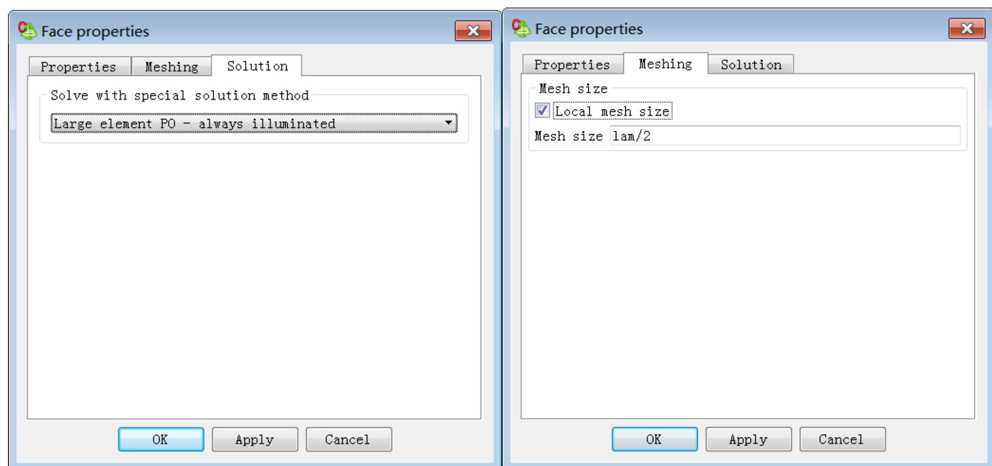


图 5-143　反射面（计算方法与网格剖分设置）

（2）修改激励源

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，展开“Global”结点中的“Sources”结点，选中“SphericalSource1”，单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除所有的激励源。

选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Far field”选项，弹出“Add far field point source”对话框，进行如下设置。

单击“Field data”下拉列表框后面的加号，选择”Define far field data”选项。

在弹出的对话框中选择“Load field data from a FEKO (*.ffe) file”。

单击“Browse”按钮，读入远场数据文件“Dual_Mode_Horn_ff3D.ffe”。

Number of Theta points: 73。

Number of Phi points: 73。

“Workplane”选项卡中的参数采用默认设置。单击“Create”按钮。

在“Add far field point source”对话框中的“Field data”中选择定义好的“FarFieldData1”，进入“Workplane”选项卡：

在“Origin”区域定义：（X：0.0，Y：0.0；Z：F）。

U vector：（X：cos(psi_C); Y：0.0; Z：sin(psi_C)）。

V vector：（X：0.0; Y：−1.0; Z：0.0）。

Label: RadiationPattern1。

单击“Create”按钮，如图 5-144 所示。

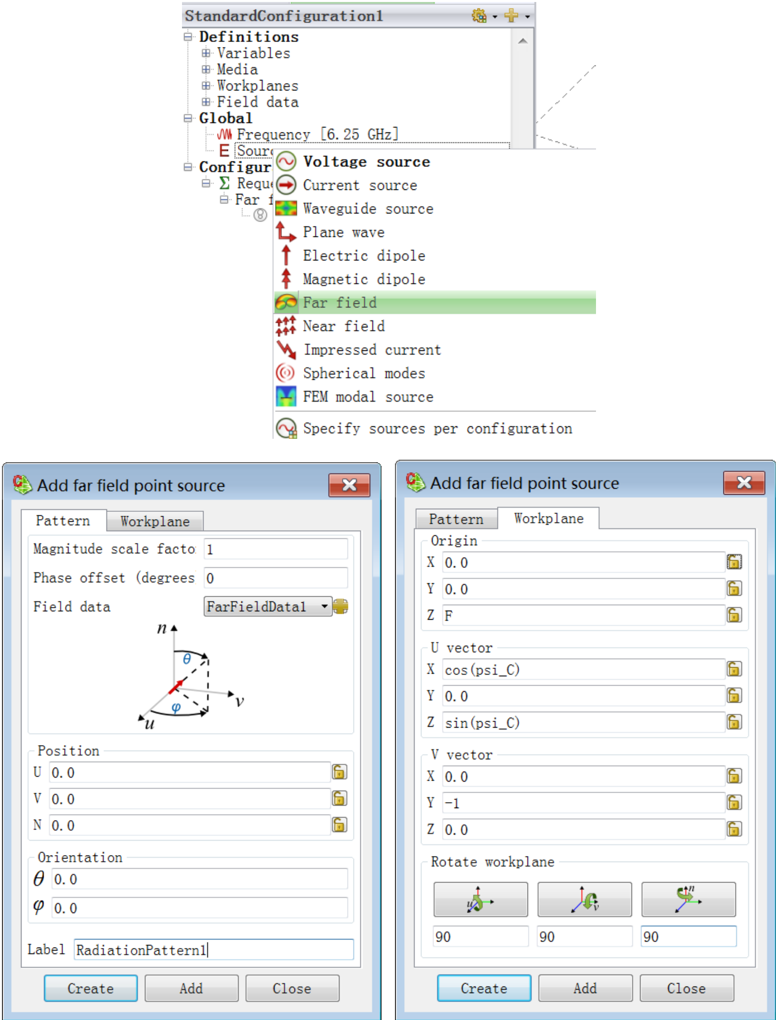


图 5-144　定义远场点源等效源

（3）网格生成

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮生成网格。

（4）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（5）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

（6）显示 2D 结果

在“Home”菜单，单击“Add model”按钮，同时读入结果文件“Offset_reflector_Aperture_Source_LEPO.bof”“Offset_Reflector_MoM_LEPO.bof”“Offset_reflector_sperical_Source_GO.bof”“Offset_reflector_sperical_Source_MLFMM.bof”。

单击“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Far field”→“ff3D”，把上述结果文件的结果依次读入到直角坐标系中，会在直角坐标系中直接显示 Phi=0° 极化平面上的 2D 增益方向图，如图 5-145 所示。

在右侧控制面板中，同时选中所有的 Traces，修改设置：

Independent axis (Horizontal)：Theta (wrapped)。

Quantity：Gain。

勾选：dB。

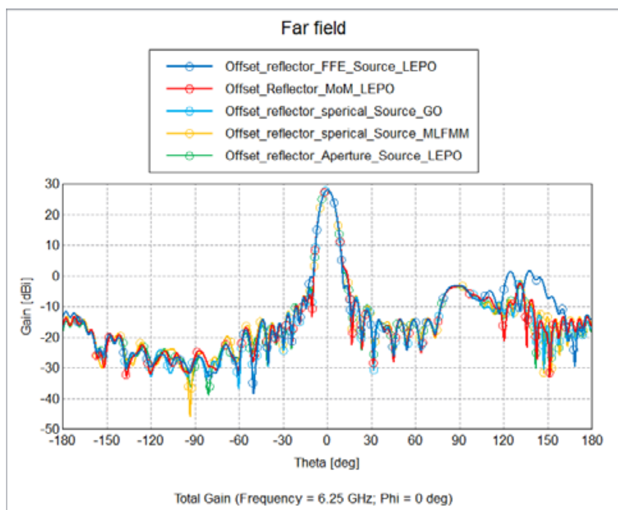


图 5-145　XOZ 平面辐射方向图（多种计算方法的结果对比）

在起始菜单中单击“Save as”按钮，保存计算结果文件为“Offset_Reflector_ compare.pfs”。

5.6　微带天线

微带天线由一块厚度远小于波长的介质板及接地板和辐射单元组成。辐射单元的形状可以是方形、矩形、圆形、椭圆形等。微带天线的馈电分为侧馈和底馈。侧馈是指馈线从辐射

单元侧面馈入，底馈指馈线从微带天线底部接入，底馈通常采用同轴线方式。

本节案例为矩形微带贴片天线，馈电方式采用探针馈电+电压激励的方法实现，分别采用矩量法（MOM）和时域有限差分（FDTD）方法实现。微带天线模型如图 5-146 所示。

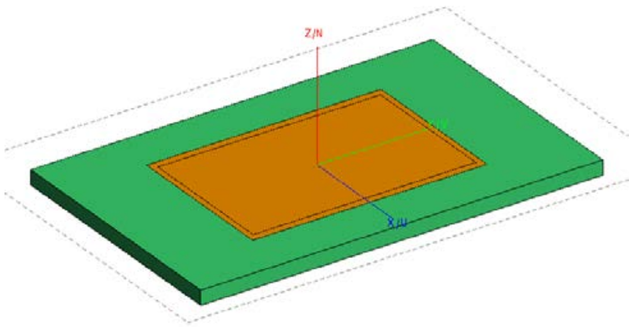


图 5-146　微带天线模型

5.6.1　矩量法（MoM）的实现

启动 CADFEKO，新建一个工程“Microstrip_MoM_3.0GHz.cfx”。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Millimetres(mm)”单选按钮，如图 5-147 所示。默认单位为 m（米）。

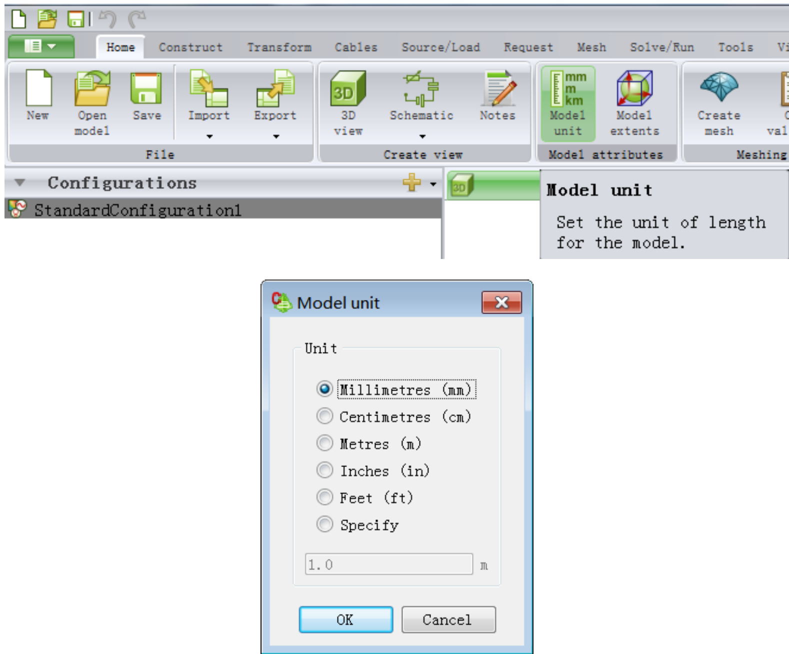


图 5-147　长度单位设置

（2）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

最小工作频率：fmin=2.7e9。

最大工作频率：fmax=3.3e9。

工作频率：freq=3e9。

工作波长：lam=c0/freq/0.001。

相对介电常数：epsr=2.2。

天线贴片宽边长度：lenY=46.648。

天线贴片窄边长度：lenX=31.1807。

介质基板宽边长度：sub_LenY=80。

介质基板窄边长度：sub_LenX=50。

介质基板厚度：sub_H=2.87。

馈电偏移位置：offsetX=8.9。

贴片边沿网格剖分规则：mesh_shell=1.5。

（3）定义材料

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric medium”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中，定义相对介电常数“Relative permittivity”和介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”为“0.0”，名称定义为“substrate”，如图 5-148 所示，单击“Create”按钮。

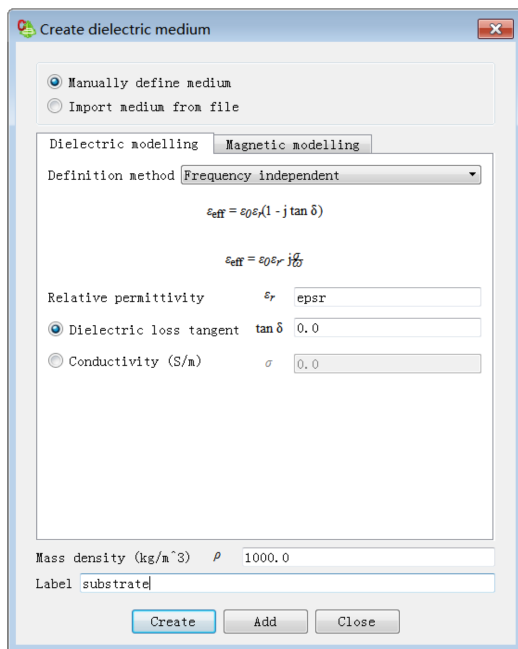


图 5-148　介质材料定义

（4）模型建立

天线模型建立，单击“Construct”菜单中的“Rectangle”按钮，弹出“Create rectangle”

对话框，进行如下设置。

Definition methods：Base centre, width, depth。

Base centre (C)：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Width (W)：lenX。

Depth (D)：lenY。

Label：patch。

单击“Add”按钮，继续设置。

Width(W)：lenX*0.9。

Depth(D)：lenY*0.95。

Label：patch2。

单击“Create”按钮，如图 5-149 所示。

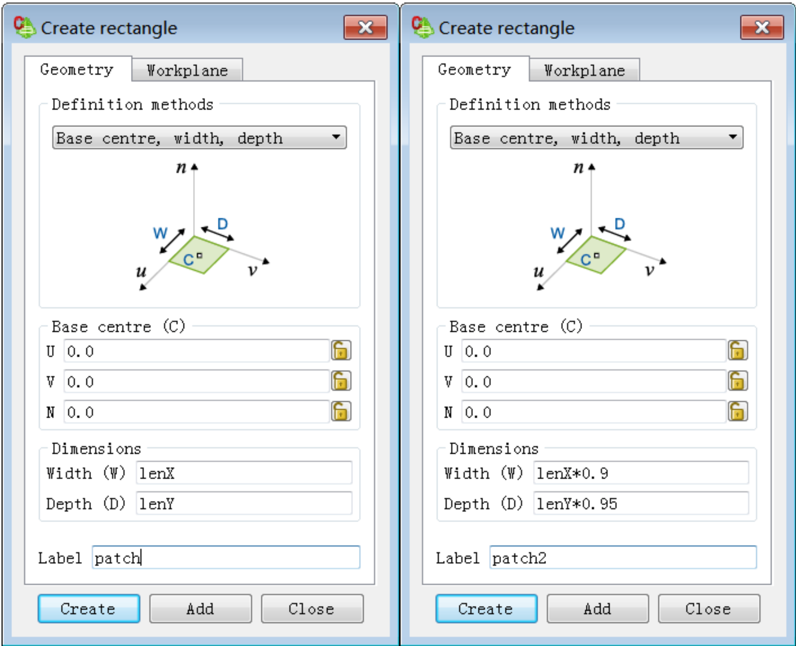


图 5-149 创建贴片

在“Construct”菜单中，单击“Cuboid”按钮，弹出“Create cuboid”对话框，进行如下设置。

Definition methods：Base centre, width, depth，height。

Base centre (C)：（U：0.0, V：0.0, N：-sub_H）。

Width(W)：sub_lenX。

Depth(D)：sub_lenY。

Height (H)：sub_H。

Label：substrate。

单击“Create”按钮，如图 5-150 所示。

在“Construct”菜单中，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，进行如下设置。

Start Point：（U：-offsetX，V：0.0, N：-sub_H）。

End point：（U：-offsetX, V：0.0, N：0.0）。

Label：feed_Pin。

单击“Create”按钮，如图 5-151 所示。

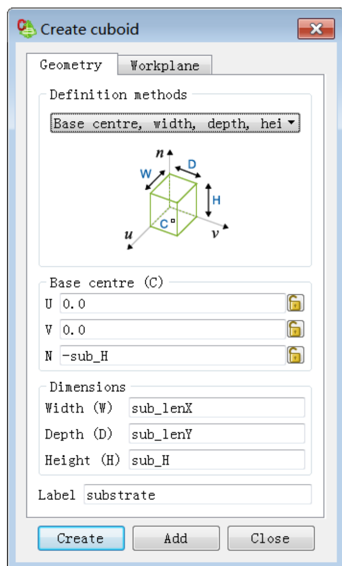


图 5-150　创建介质基板

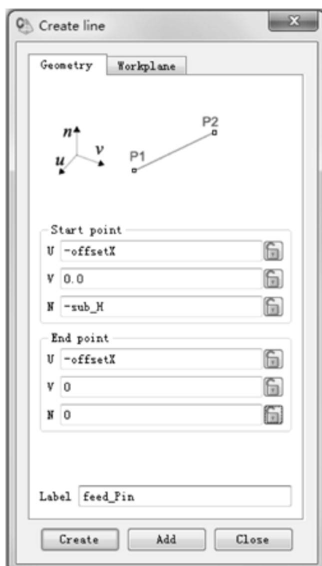


图 5-151　创建探针模型

（5）天线模型材料设置

在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中“patch”，在详细树形浏览器中，展开其“faces”，选择“Face1”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，在弹出的“Face properties”对话框中，设置“Medium”为“Perfect electric conductor”，单击“OK”按钮，如图 5-152 所示。使用同样的方法设置模型“patch2”的面元“Face*”材料属性为“PEC”。

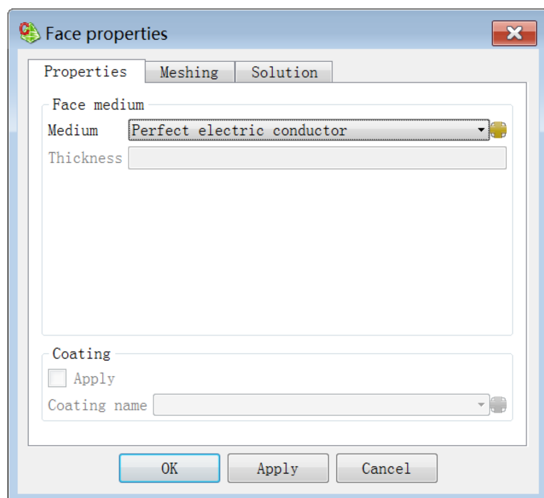


图 5-152　设置“patch”和“patch2”两个面属性为 PEC

在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中“substrate”，在详细树形浏览器中，展开其“Regions”，选择“Region1”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，在弹出的“Region properties”对话框中，设置“Medium”为“substrate”，单击“OK”按钮，如图 5-153 所示。

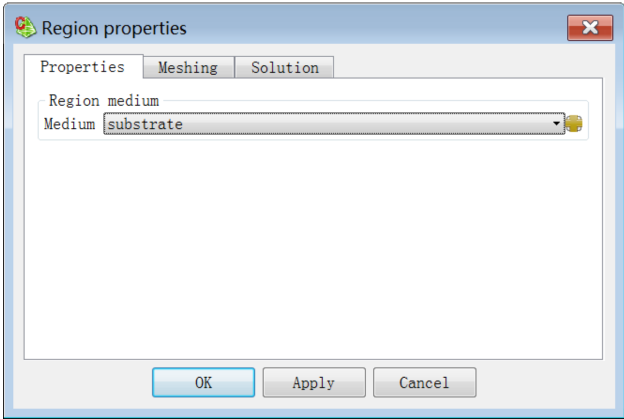


图 5-153　设置 Region 属性为“substrate”

在 3D 视图中，选择介质体的底部平面，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，在弹出的“Face properties”对话框中，设置“Medium”为“Perfect electric conductor”，单击“OK”按钮。

（6）天线端口设置

在左侧的树形浏览器的“Model”→“Geometry”结点中选择“feedPin”，在其“Details”中展开“Wires”结点，选择“Wire?”，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，在弹出的“Create wire port（geometry）”对话框中，把“Location on wire”设置为“Start”，在“Label”文本框中输入“Port1”，单击“Create”按钮，如图 5-154 所示。

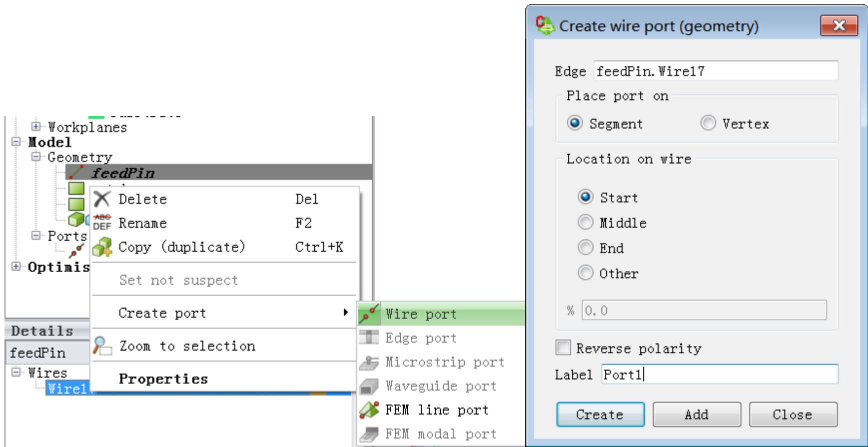


图 5-154　创建 Wire Port 端口

在树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，选择所有的模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“microstrip”。

（7）电参数与求解设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

（8）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Voltage Source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 5-155 所示。

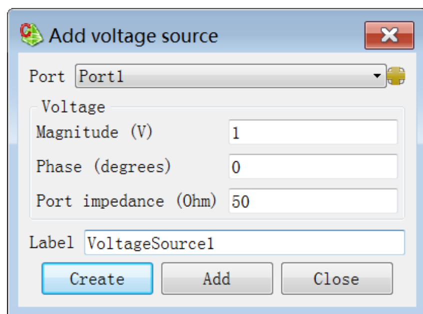


图 5-155　添加电压激励

（9）辐射远场设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，如图 5-156 所示，进行如下设置。

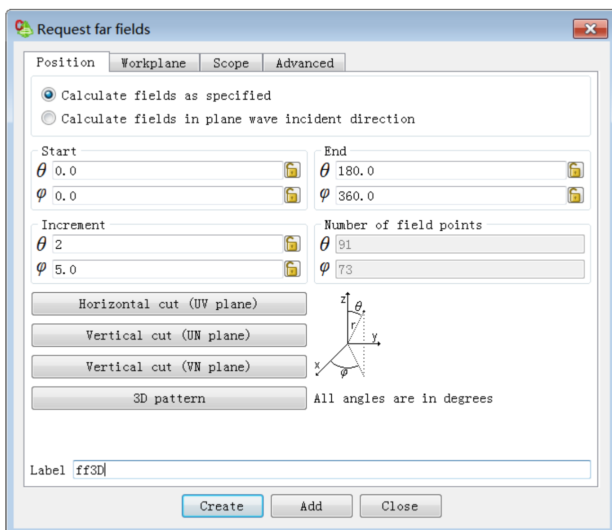


图 5-156　3D 方向图计算设置

单击“3D pattern”按钮，修正步长“Increment”中 Theta 的值为 2，在“Label”文本框中输入“ff3D”，单击“Add”按钮。

单击“Vertical cut (UN plane)”按钮，修正步长“Increment”中 Theta 的值为 1，在“Label”文本框中输入“ffXOZ”，单击“Create”按钮，如图 5-157 所示。

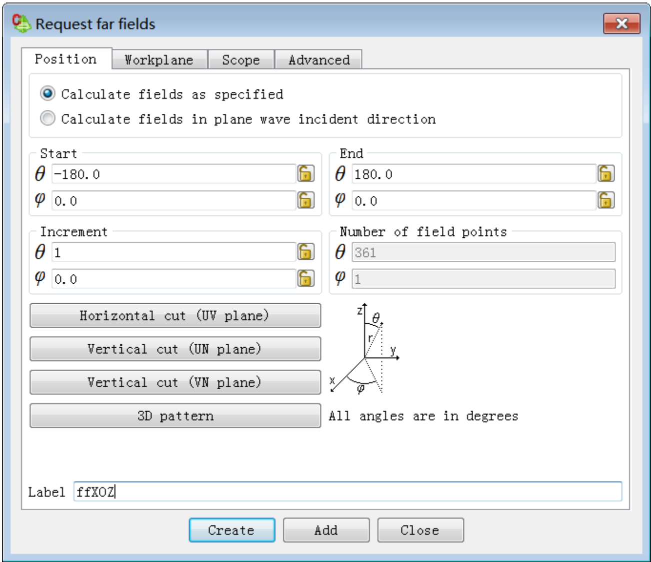


图 5-157　XOZ 面方向图计算设置

（10）网格划分

在 3D 视图中，选中贴片的边缘面，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，在弹出的“Face properties”对话框中进行如下设置。

勾选：Local mesh size。

Mesh size: mesh_shell。

单击“OK”按钮，如图 5-158 所示。

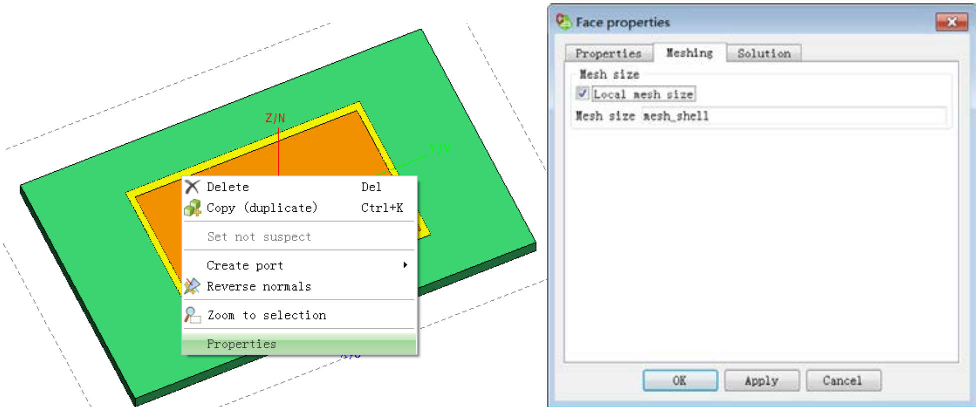


图 5-158　贴片边缘面局部网格剖分设置

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Fine。

线段剖分单元半径“Wire segment radius”：0.25。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-159 所示。

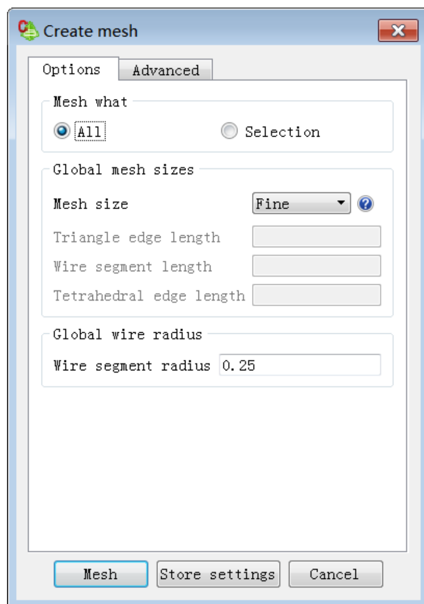


图 5-159　网格剖分

在“Solve/Run”菜单中单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（11）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

在 POSTFEKO 中，启动之后默认显示 3D 视图方式，单击“Far Field”按钮，选择“ff3D”，以显示 3D 辐射方向图，如图 5-160 所示。在右侧面板中，勾选“dB”复选框。

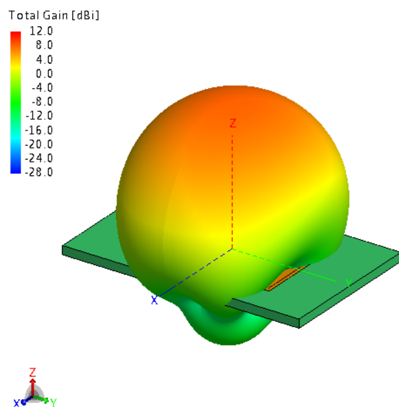


图 5-160　微带天线 3D 方向图

（12）显示 2D 结果

单击“Home”菜单中的“Polar”按钮，进入极坐标系，单击“Far field”按钮，选择“ffXOZ”，以显示 XOZ 面方向图，如图 5-161 所示。在右侧面板中，勾选“dB”复选框。

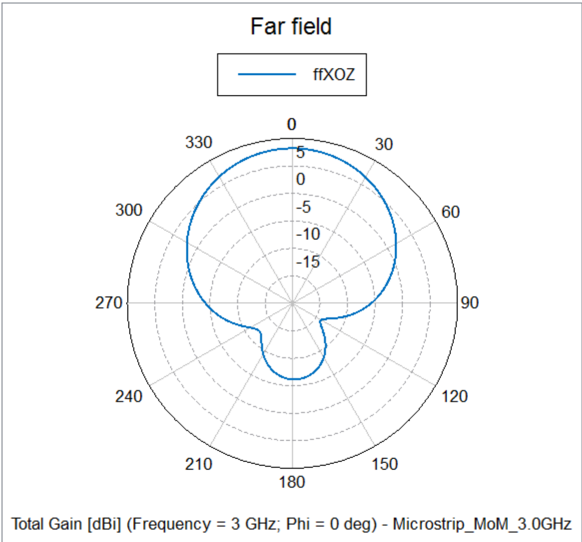


图 5-161　微带天线 XOZ 面方向图

单击“Home”菜单中的“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Source data”按钮，在右侧控制面板中，把“Quantity”修正为“Impedance”，选中“Real”单选按钮，如图 5-162 所示。选中右侧控制面板中的“Source”，按〈Ctrl+K〉快捷键，复制该曲线为 source_1，把“Impedance”参数设定为“Imaginary”。

进入“Measure”菜单，单击“Cursors”，显示 3.0GHz 时天线的输入阻抗实部和虚部值。

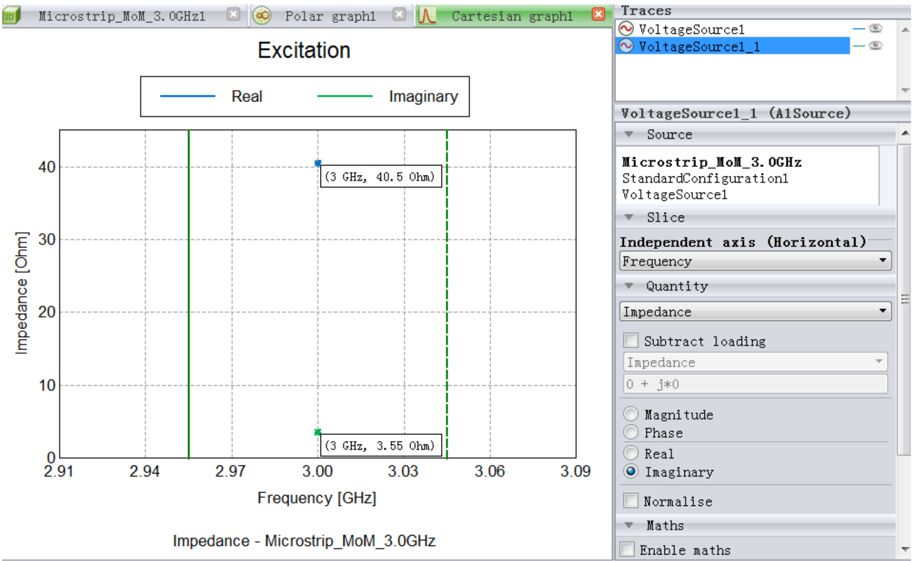


图 5-162　微带天线端口阻抗

从图 5-162 可见，当 3.0GHz 时，该微带天线单元的阻抗实部为 40.5 Ohm，虚部为 3.55 Ohm，单击保存。

5.6.2 时域有限差分（FDTD）的实现

在 CADFEKO 中，把“Microstrip_MoM_3.0GHz.cfx”另存为“Microstrip_FDTD.cfx”。

进入“Solve/Run”菜单，单击“Solver Settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，选择“FDTD”选项卡，勾选“Activate the finite difference time domain (FDTD) solver”复选框，如图 5-163 所示，单击“OK”按钮。

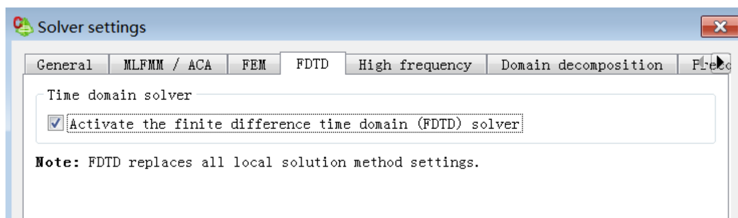


图 5-163 设置 FDTD 求解方法

进入“Solve/Run”菜单，单击“FDTD boundary conditions”按钮，在弹出的“Boundary Condition Settings”对话框中将所有 6 个方向的边界均设置为“Open”，并选中“Automatically add a free space buffer”单选按钮，如图 5-164 所示。

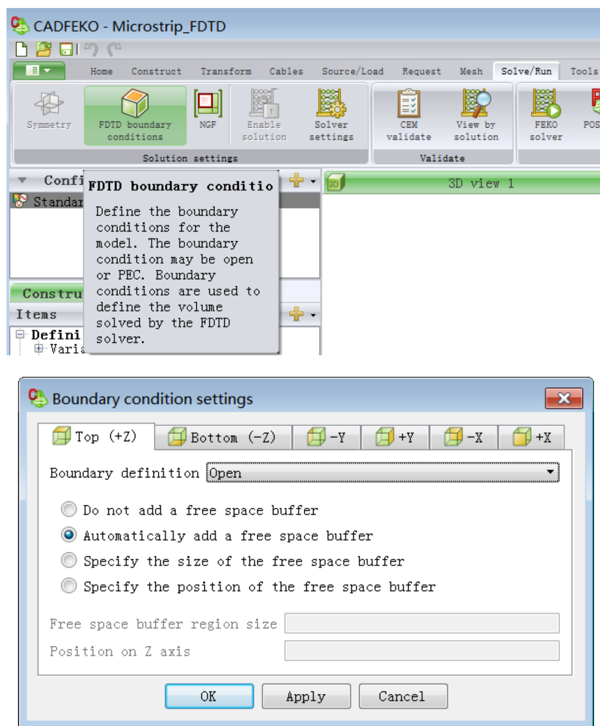


图 5-164 设置 FDTD 边界

进入“Mesh”菜单，单击“Create mesh”按钮，采用默认设置，单击“Mesh”按钮，生成网格，如图 5-165 所示。

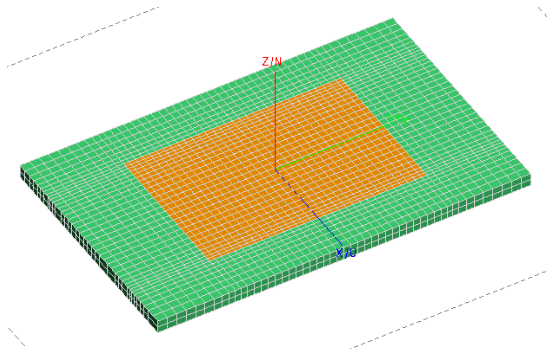


图 5-165 微带天线的FDTD网格

设置扫频计算：在左侧的树形浏览器中，进入“Configuration”，双击“Global”结点中的“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

扫频方式选择：Linearly spaced discrete points。

Start frequency：fmin。

End frequency：fmax。

Number of frequencies：7。

单击“OK”按钮，如图 5-166 所示。

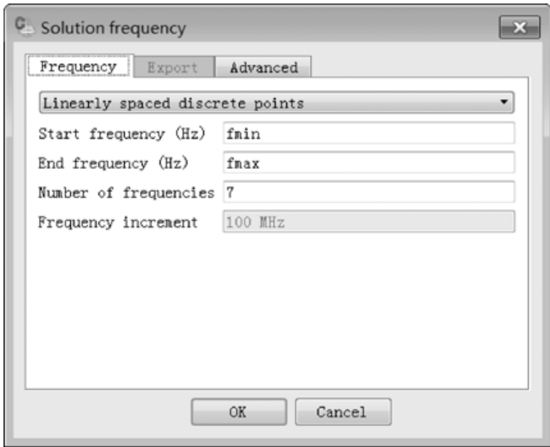


图 5-166 扫频设置

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。计算完成后，切换到已经打开的 POSTFEKO，单击“Home”菜单中的“Cartesian”按钮，进入已经显示的“Cartesian”直角坐标系中。单击“Home”菜单中的“Add Model”按钮，选择“Microstrip_FDTD.bof”，并把时域方法计算的辐射结果读进来，比较 3GHz 下，MoM 方法与 FDTD 方法 2D 方向图的对比，如图 5-167 所示，选择 dB 显示。

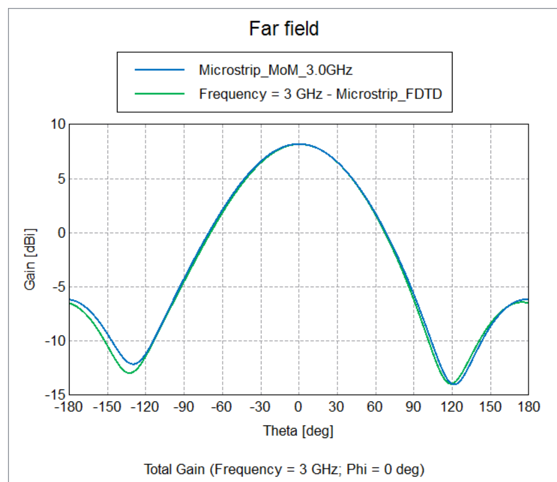


图 5-167 微带天线 MoM 与 FDTD 方法计算结果对比

5.7 介质谐振天线（DRA）

介质谐振器已广泛应用于滤波器、振荡器等多种微波元器件中，在选择适当形状、介电常数以及馈电方式的情况下，介质谐振器可以作为天线使用。常见的介质谐振天线（DRA）馈电方式包括探针馈电、微带线、微带缝隙、波导缝隙及共面波导 CPW 等。本节案例采用同轴探针激励介质谐振天线。

本节案例演示采用同轴馈电方式激励一介质谐振天线。该天线采用有限大地板，分别采用两种方法计算其输入阻抗及辐射方向图。第 1 种方法采用完全的矩量法实现，第 2 种方法采用矩量法/有限元混合方法实现。图 5-168 所示为天线的结构模型（使用网格线方式显示）。

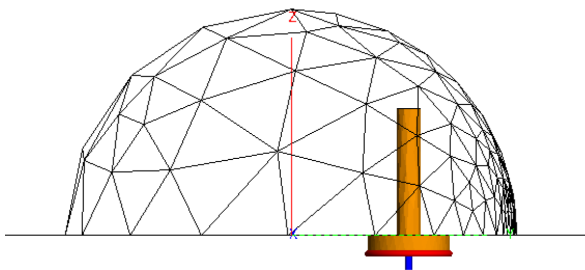


图 5-168 介质谐振器及探针模型

5.7.1 矩量法（MoM）的实现

启动 CADFEKO，新建一个工程“DRA_Finite_MoM.cfx”。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，如图 5-169 所示。在弹出的“Model unit”对话框中，选中“Millimetres(mm)”单选按钮，如图 5-170 所示。

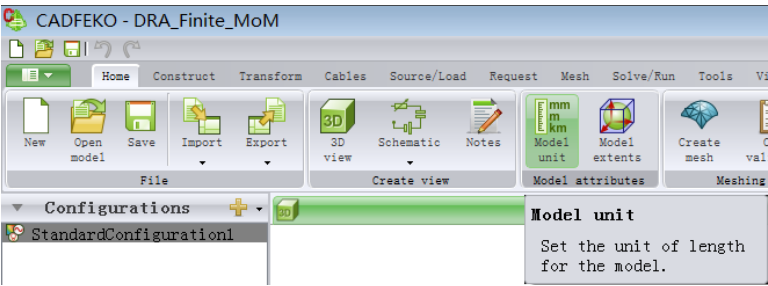


图 5-169　选择单位设置菜单



图 5-170　单位设置

（2）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

介质相对介电常数：espr= 9.5。

同轴馈电内芯半径：r=0.63。

同轴馈电外芯高度：hBig=1。

同轴馈电外芯半径：rBig=2.25。

金属地板半径：rDisk=60。

内部介质半球半径：rDome=12.5。

外部空气介质半球半径：rDomeBig=rDome+5.5。

同轴线内芯在外芯外部的高度：h=7。

最低频率：fmin=3e9。

最高频率：fmax=6e9。

最高频率对应波长（单位为 mm）：lambda=c0/fmax*1000。

（3）定义 named point

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中选中“Definition”结点，单击鼠标右键，选择“Add point”选项，如图 5-171 所示，在弹出的“Create named point”对话框中进行如下设置。

Name：excite_b。

Point：（X: 0, Y：6.5, Z：-1）。

单击“Create”按钮，如图 5-172 所示。

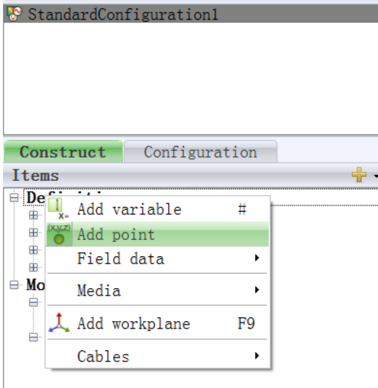


图 5-171　选择 named point 创建对话框

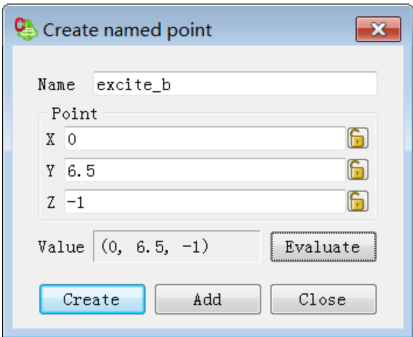


图 5-172　创建 named point“excite_b”

（4）定义材料

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric medium”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中进行如下设置。

相对介电常数“Relative permittivity”：espr。

Label：dome。

单击“Add”按钮，继续设置。

修改相对介电常数“Relative permittivity”：2.33。

Label：isolator。

单击“Create”按钮，如图 5-174 所示。

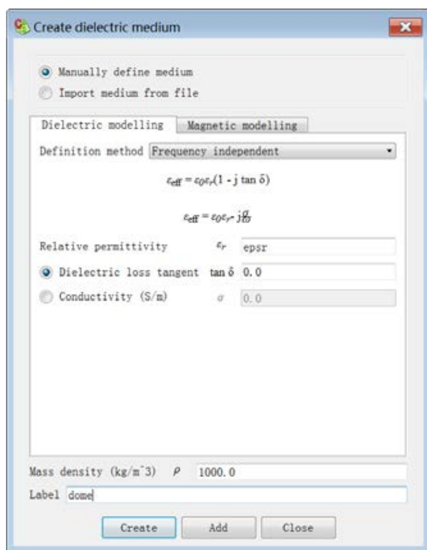


图 5-173　定义介质材料“dome”

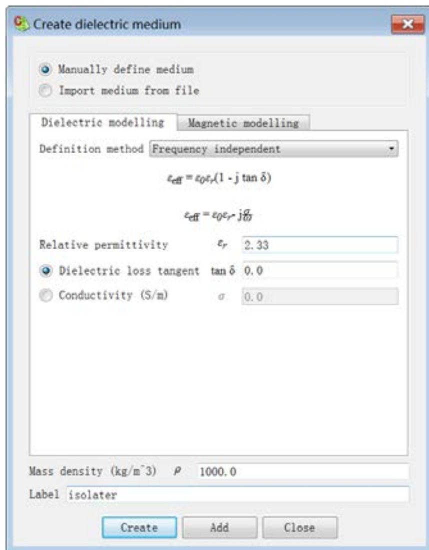


图 5-174　定义介质材料“isolator”

（5）定义工作平面“Workplane_b”

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中，选中“Workplanes”结点，单击鼠标右键，选择“Add workplane F9”选项，或直接按〈F9〉键，在弹出的“Create workplane”对话框中进行如下设置。

把光标定在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击上一步定义的关键点“excite_b”。

U vector：(X：1.0; Y：0.0; Z：0.0)。

V vector：(X：0.0; Y：1.0; Z：0.0)。

Label：Workplane_b。

单击“Create”按钮，如图 5-175 所示。

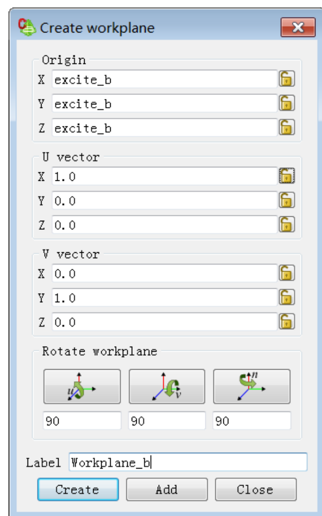


图 5-175　定义工作平面

（6）建立天线模型

首先在树形浏览器中，展开“Definitions”结点，在“Workplanes”中选择定义的坐标系“workplane_b”，单击鼠

标右键，选择“set as default”选项，将此坐标系设置为默认坐标系。

单击“Construct”菜单中的“Cylinder”按钮，弹出“Create cylinder”对话框，进行如下设置。

Definition methods：Base centre, radius, height。

Base centre (B)：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Radius(R)：rBig。

Height(H)：hBig。

Label：FeedBase，如图 5-176 所示。

单击“Add”按钮，创建另一个圆柱，修改参数如下。

Radius(R)：r。

Height(H)：h+hBig。

Label：FeedPin。

单击“Create”按钮，如图 5-177 所示。

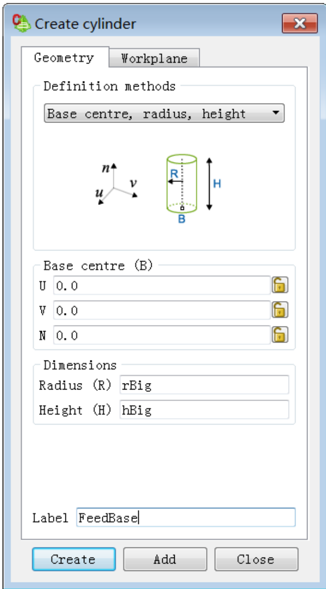


图 5-176 创建馈电同轴外圆柱图

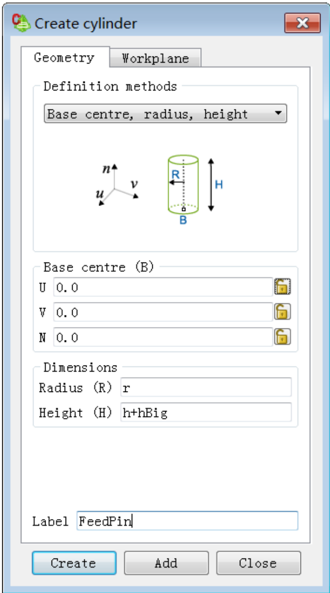


图 5-177 创建馈电同轴内导体圆柱

在树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，选择创建的 FeedBase 和 FeedPin，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，选择新生成的模型，单击鼠标右键，选择“Rename”选项，把新生成的模型更名为“Feed”。

在树形浏览器中，展开“Definitions”结点，在“Workplanes”中选择坐标系“Global XY”，单击鼠标右键，选择“set as default”选项，将此坐标系设置为默认坐标系。

在“Construct”菜单中单击“Ellipse”按钮，弹出“Create ellipse”对话框，进行如下设置。

Centre point：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Radius(U)：rDisk。

Radius(V)：rDisk。

Label：disk。

单击“Create”按钮，如图 5-178 所示。

在“Construct”菜单中单击“Sphere”按钮，弹出“Create sphere”对话框，进行如下设置。

Centre：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Radius：rDome。

Label：InnerDome。

单击“Create”按钮，如图 5-179 所示。

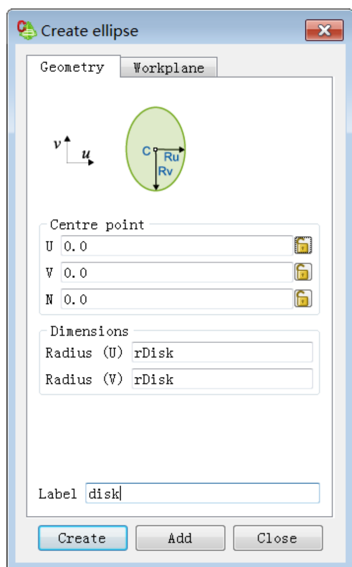


图 5-178　创建地板“disk”

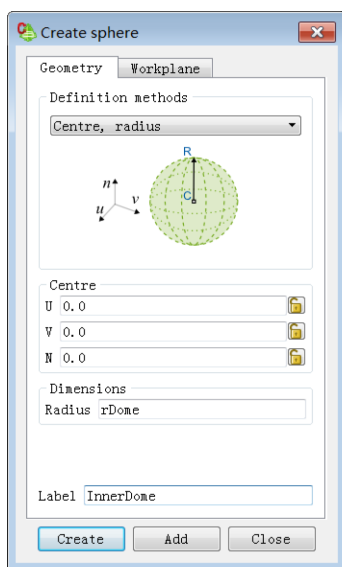


图 5-179　创建介质球

在树形浏览器中，选择创建的所有模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项。选择新生成的模型，单击鼠标右键，选择“Rename”选项，把新生成的模型更名为“DRA”。

选择下半球面，单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除下半球面，如图 5-180 所示。

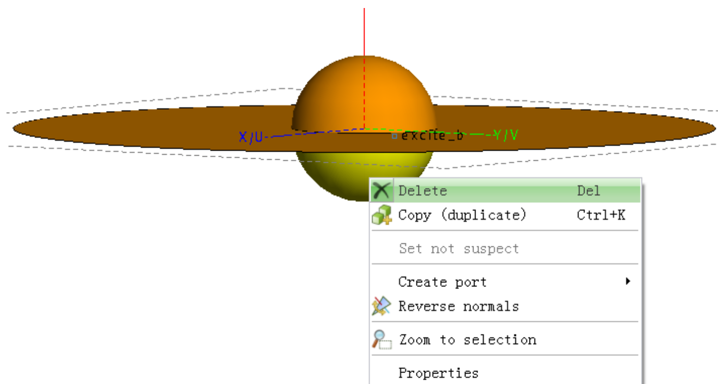


图 5-180　删除下半球面

在树形浏览器的“Details”中的“Regions”结点中选择馈电同轴线外圆柱体，如图 5-181 所示。单击鼠标右键，选择“Properties”选项。在“Region properties”对话框中的“Medium”下拉列表框中选择“isolator”选项设置材料属性，如图 5-182 所示。

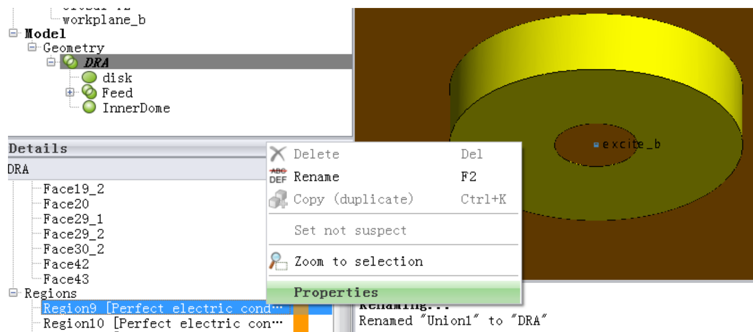


图 5-181　选择馈电同轴线外圆柱体

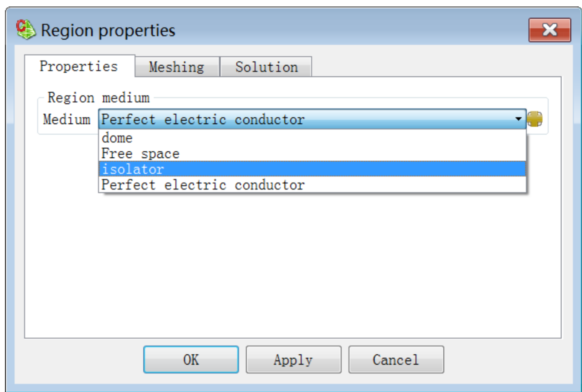


图 5-182　设置馈电同轴线外圆柱体的“Region medium”参数为“isolator”

在树形浏览器的“Details”中的“Regions”结点中选择上半球体，如图 5-183 所示。单击鼠标右键，选择“Properties”选项。在“Medium”下拉列表框中选择“dome”选项设置材料属性，如图 5-184 所示。

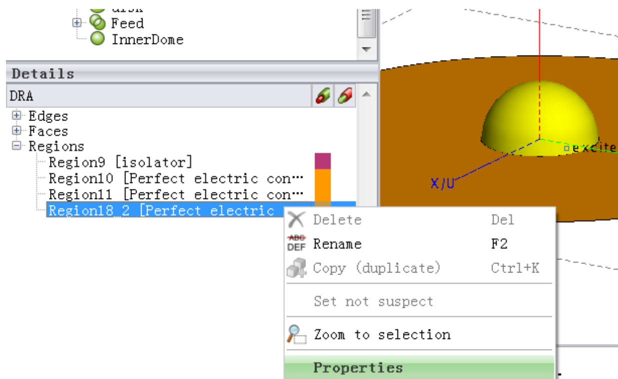


图 5-183　选择上半球体

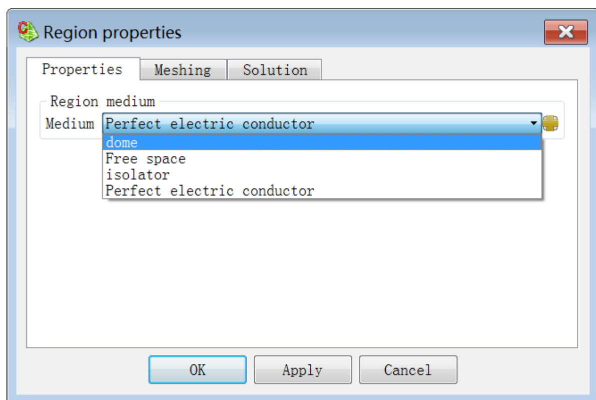


图 5-184　设置上半球体的“Region medium”参数为“dome”

在树形浏览器的“Details”中的“Faces”结点中选择除“上半球面”和“同轴馈电端面两个端面（Z=0 和 Z = − hBig）”以外的所有“Faces”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，如图 5-185 所示。在“Face medium”区域内的“Medium”下拉列表框中选择“Perfect electric conductor”选项设置其属性，如图 5-186 所示。

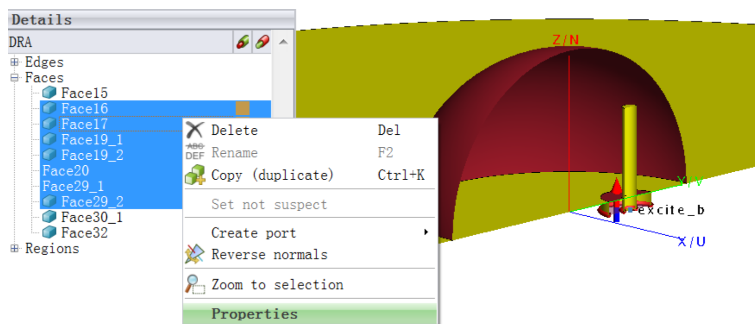


图 5-185　选择除“上半球面”和“同轴馈电两个端面”以外的所有“Faces”

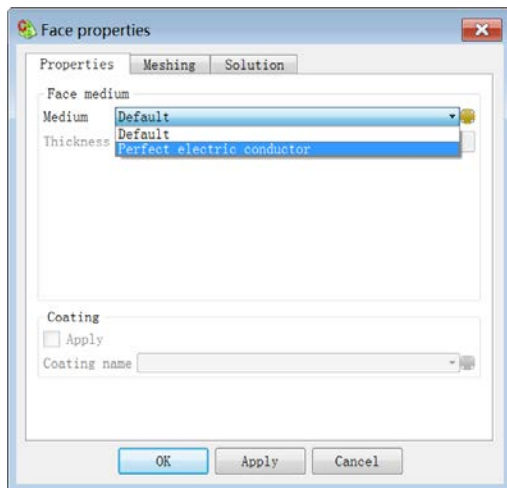


图 5-186　设置“Faces”材料属性

在树形浏览器中选中“DRA”结点，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simplify”选项，如图 5-187 所示，简化掉多余的面。

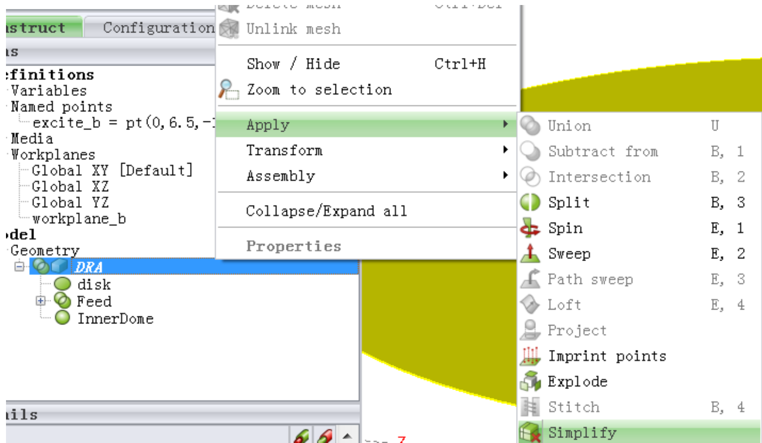


图 5-187 选择“Simplify”选项建模模型

图 5-188 所示是“Simplify geometry”对话框中的具体选项，可利用此功能对模型进行简化。本案中应用此功能对同轴线的内导体进行简化。简化前内导体被地板 disk 分割为上下两部分，简化后自动删除了中间的面，将两部分合并为一个“Region”。观察“Detail”中的“Region”可以看出其变化。此选项对简化模型非常有用，但需要在对话框中对一些选项进行选择。

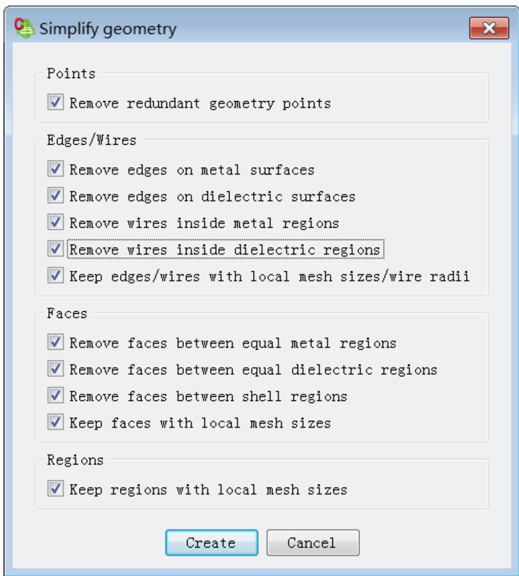


图 5-188 “Simplify geometry”对话框

简化好的模型包含 3 个“Region”，分别为“dome”“isolator”和“Perfect electric conductor”，如图 5-189 所示。

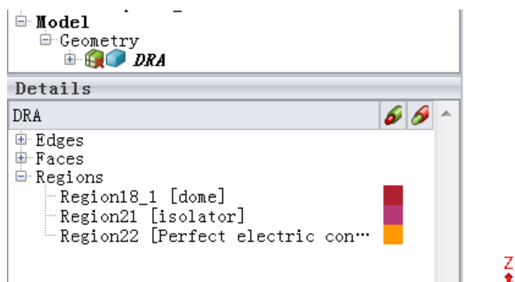


图 5-189　3 个“Region”

（7）设定波导端口

在 3D 视图区域，把模型移动和缩放到适合的角度，单击鼠标左键自动切换到面选模式。选中同轴馈线的底部面元，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Waveguide port”选项，如图 5-190 所示，弹出“Create waveguide port（geometry）”对话框，进行如下设置。

勾选“Propagation direction opposite to normal”复选框，目的是要使得该面添加的波导信号是向里传播的，即红色箭头朝里。

Label：Port1

单击“Create”按钮，如图 5-191 所示。



图 5-190　定义波导端口

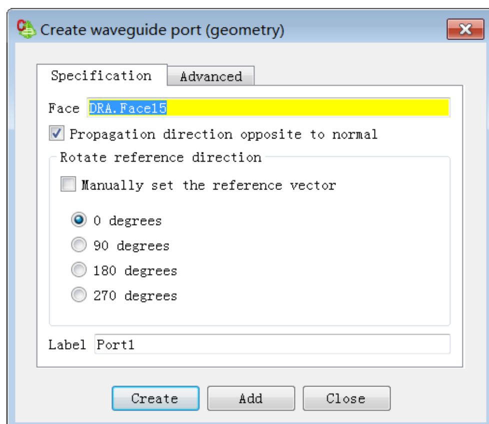


图 5-191　选择波导信号传播方向

（8）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选中：Continuous (interpolated) range。

Start frequency (Hz)：fmin。

End frequency (Hz)：fmax。

单击“OK”按钮。

（9）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Waveguide source”选项，弹出“Add waveguide source”对话框，进行如下设置。

选中：Excite fundamental mode only。

Fundamental mode:

Magnitude：1。

Phase：0。

Rotation：0。

Label：wgSource。

单击“Create”，如图 5-192 所示。

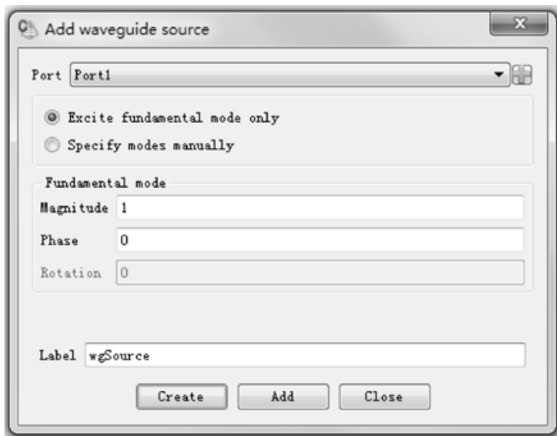


图 5-192　定义端口激励“WaveguideSource1”

（10）求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“Vertical cut (UN plane)”按钮。

theta 的 Increment：2.0。

Phi 的 Increment：0.0。

Label：ff_XZ。

单击“Create”按钮，如图 5-193 所示。

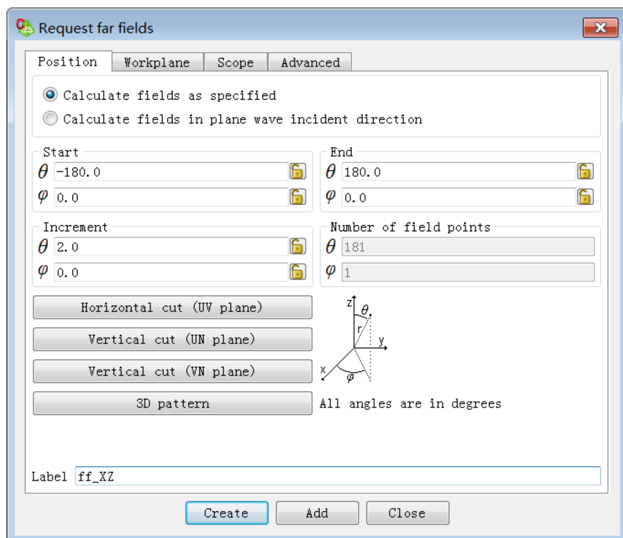


图 5-193　远场方向图求解设置（XOZ 面 Pattern）

（11）对称性设置

设置 X=0 面为磁对称面。在“Solve/Run”菜单中单击“Symmetry”按钮，在弹出的“Symmetry definition”对话框中设置“X=0 plane”为“Magnetic symmetry”，单击“OK”按钮，如图 5-194 所示。

（12）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Coarse。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-195 所示。

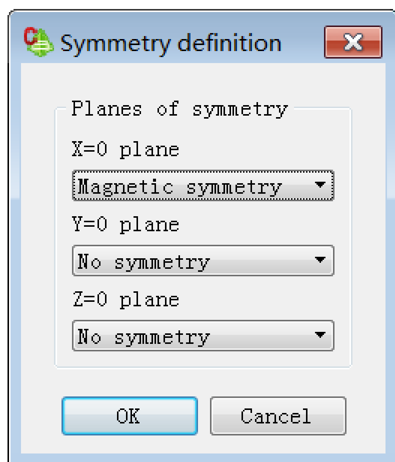


图 5-194　设置 X=0 面为磁对称面

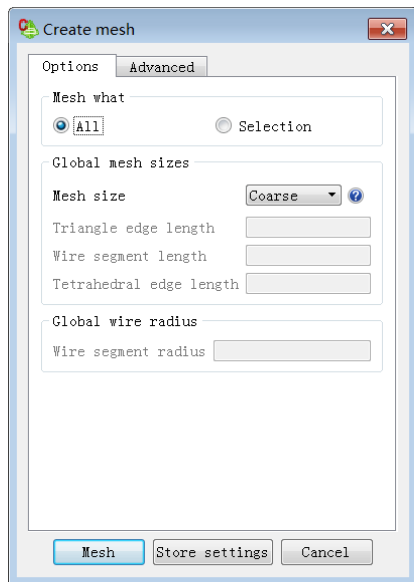


图 5-195　定义网格划分

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（13）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

在 POSTFEKO 中，启动之后默认显示是 3D 视图方式。

显示 S11 结果。单击“Home”菜单中的“Cartesian”按钮，进入直角坐标系，单击“Source data”按钮，选择“wgSource”，添加端口计算结果，如图 5-196 所示。在右侧面板中，勾选“dB”复选框。

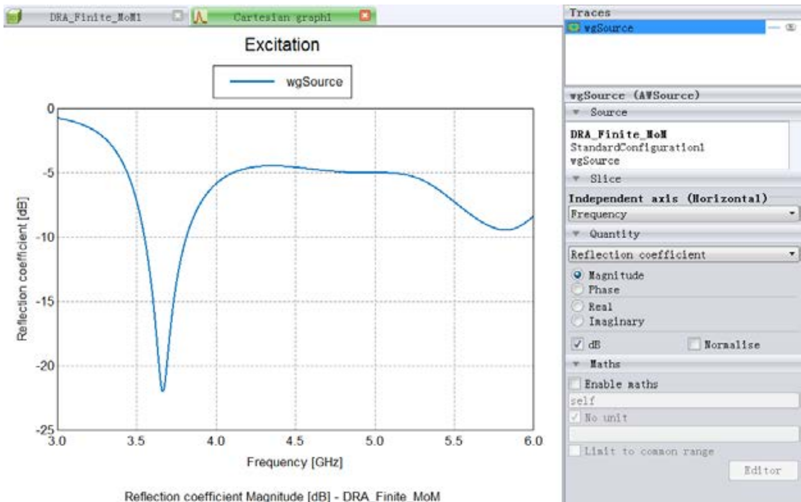


图 5-196　DRA 天线反射系数（采用 MoM 计算）

显示 2D 方向图。单击“Home”菜单中的“Polar”按钮，进入极坐标系，单击“Far field”按钮选择“ff_XZ”，在右侧面板中，将“Independent axis(Angular)”设为“Theta”，选择频率为“3.6GHz”，并勾选“dB”复选框，如图 5-197 所示。

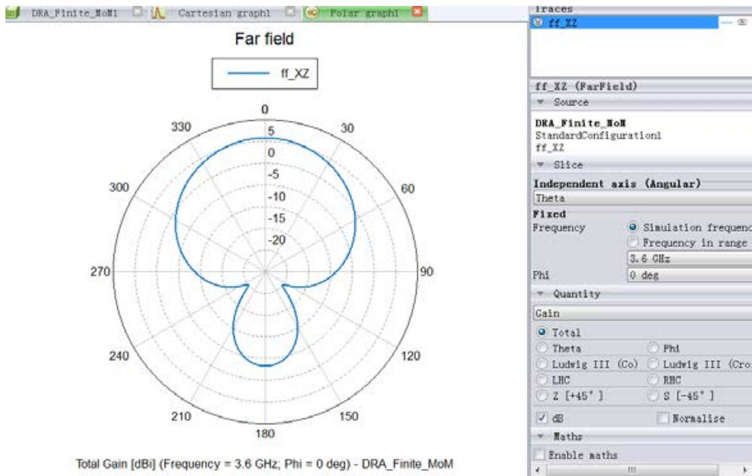


图 5-197　微带天线端口阻抗

5.7.2 矩量法/有限元（MoM/FEM）混合法的实现

打开工程“DRA_Finite_MoM.cfx”，单击起始菜单中的“Save as”按钮，将其另存为“DRA_Finite_Modal.cfx”。保留工程中的定义的变量、材料、named points 及局部坐标系。选择左侧的树形浏览器中“Geometry”结点下的天线模型“DRA”，单击鼠示右键，选择“Delete”选项进行删除。

（1）添加新材料

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中，定义相对介电常数“Relative permittivity”为 1，设置介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”为 0，名称定义为“air”，如图 5-198 所示。

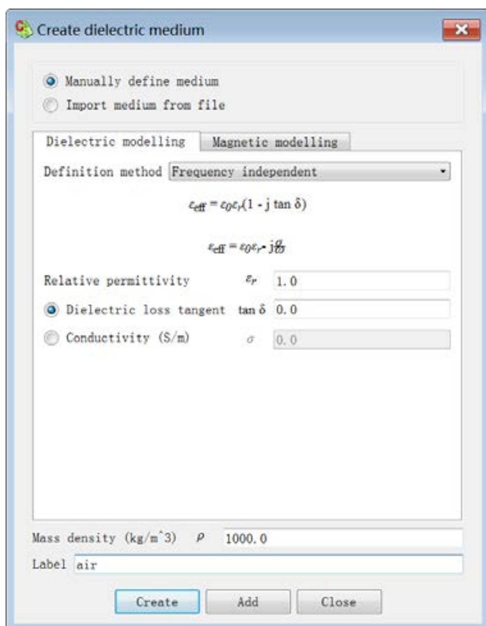


图 5-198　定义介质材料“air”

（2）建立天线模型

首先在树形浏览器中，展开“Definitions”结点，在“Workplanes”中选择定义的坐标系“workplane_b”，单击鼠标右键，选择“set as default”选项，将此坐标系设置为默认坐标系。

单击“Construct”菜单中的“Cylinder”按钮，弹出“Create cylinder”对话框，进行如下设置。

Definition methods: Base centre, radius, height。

Base centre (B)：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Radius(R)：rBig。

Height(H)：hBig。

Label：FeedBase，如图 5-199 所示。

单击“Add”按钮，创建另一个圆柱，修改参数如下。

Radius(R)：r。

Height(H)：h+hBig。

Label：FeedPin。

单击“Create”按钮，如图 5-200 所示。

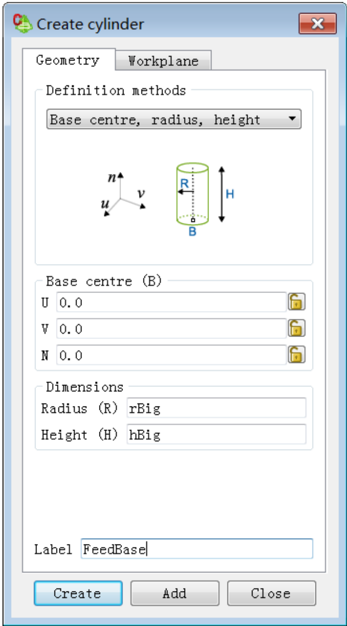


图 5-199 创建馈电同轴外圆柱

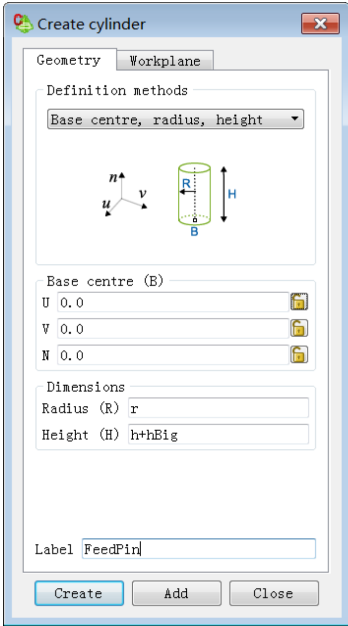


图 5-200 创建馈电同轴内导体圆柱

在树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，选择创建的 FeedBase 和 FeedPin，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，选择新生成的模型，单击鼠标右键，选择“Rename”选项，把新生成的模型更名为“Feed”。

选择“Feed”，在树形浏览器的“Details”中的“Regions”结点中选择 FeedBase 区域“Region1”，单击鼠示右键，选择“Properties”选项，如图 5-201 所示。设置此区域的“Region medium”参数为“isolator”，如图 5-202 所示。

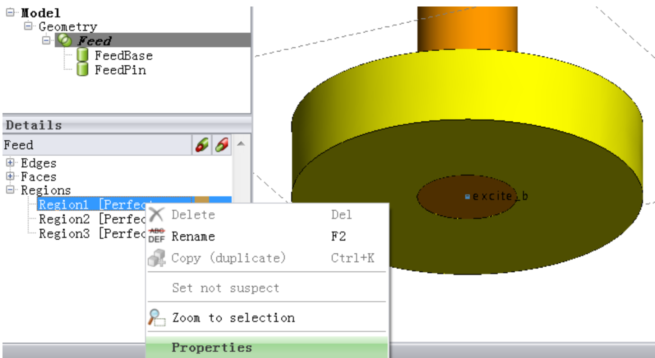


图 5-201 选择 Feedbase 的 Region

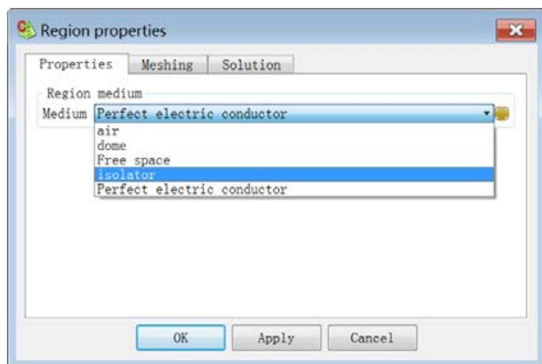


图 5-202　设置 FeedBase 的“Region medium”参数为“isolator”

同样，设置 FeedPin 的区域“Region2”和“Region3”的“Region medium”参数均为“air”。

在树形浏览器中，展开“Definitions”结点，在“Workplanes”中选择坐标系“Global XY”，单击鼠标右键，选择“set as default”选项，将此坐标系设置为默认坐标系。

在“Construct”菜单中单击“Ellipse”按钮，弹出“Create ellipse”对话框，进行如下设置。

Centre point：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Radius(U)：rDisk。

Radius(H)：rDisk。

Label：disk。

单击“Create”按钮，如图 5-203 所示。

在“Construct”菜单中单击“Sphere”按钮，弹出“Create sphere”对话框，进行如下设置。

Centre：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Radius：rDome。

Label：InnerDome，如图 5-204 所示。

单击“Add”按钮，继续设置。

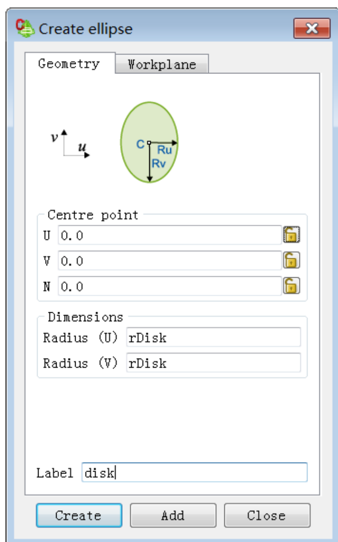


图 5-203　创建地板“disk”

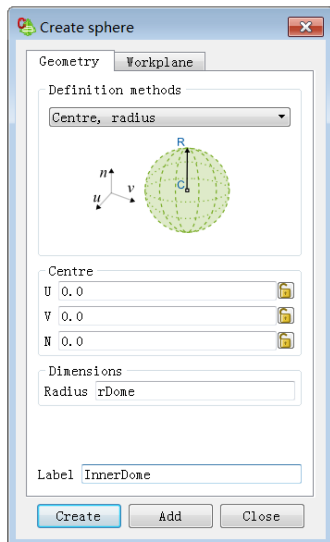


图 5-204　创建介质球“InnerDome”

Radius：rDomeBig。

Label：OuterDome。

单击“Create”按钮，如图 5-205 所示。

在树形浏览器中，选择创建的所有模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，选择新生成的模型，单击鼠标右键，选择“Rename”选项，把新生成的模型更名为“DRA”。

选择“OuterDome”和“InterDome”的下半球面，单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除两个半球面。

在树形浏览器的“Details”中的“Regions”结点下选择小半球“InterDome”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项。在“Region Medium”中选择“dome”选项设置材料属性。选择外面的大半球（实际上是包裹在“InterDome”外面的区域），将其“Region Medium”属性设置为“air”。

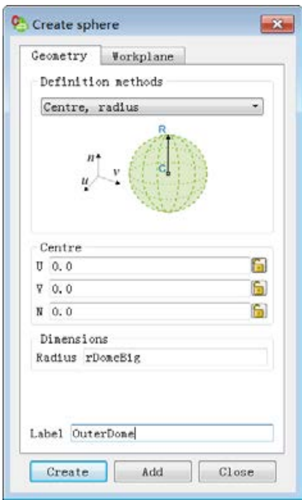


图 5-205　创建介质球“OuterDome”

（3）对介质区域设置 FEM 求解

选择所有的“Region”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，如图 5-206 所示，打开“Region propeties”对话框，选择“Solution”选项卡，在“Solution method”中设置求解方式为“Finite Element Method (FEM)”，如图 5-207 所示。

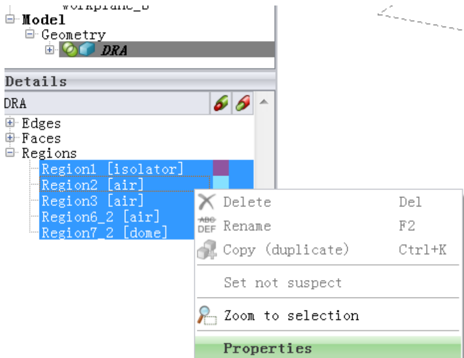


图 5-206　选择所有的“Region”

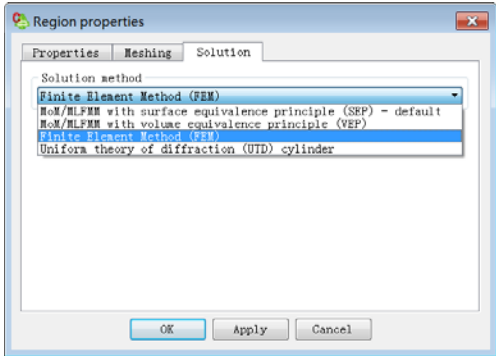


图 5-207　设置所有 Region 的求解方法为“FEM”

（4）简化模型

在树形浏览器中选择“DRA”结点，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simplify”选项，采用默认设置，简化掉多余的面。

（5）设置面元材料属性

在树形浏览器的“Details”中的“Faces”结点下，选择以下 4 个面（见图 5-208），单击鼠标右键，选择“Properties”选项。在“Face medium”中选择“Default”选项设置其属性，如图 5-209 所示。

1）“FeedBase”的上下两个端面。

2）内外两个半球面。

选择内部球面时，可以用“Display options”下的“Cutplanes”将试图切开查看，方便选择。详细使用方法参考前面章节。

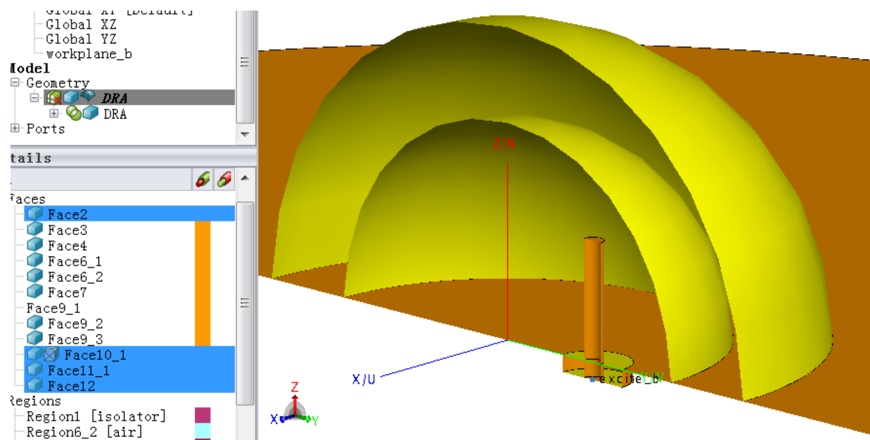


图 5-208 选择“FeedBase”的上下两个端面及内外两个半球面

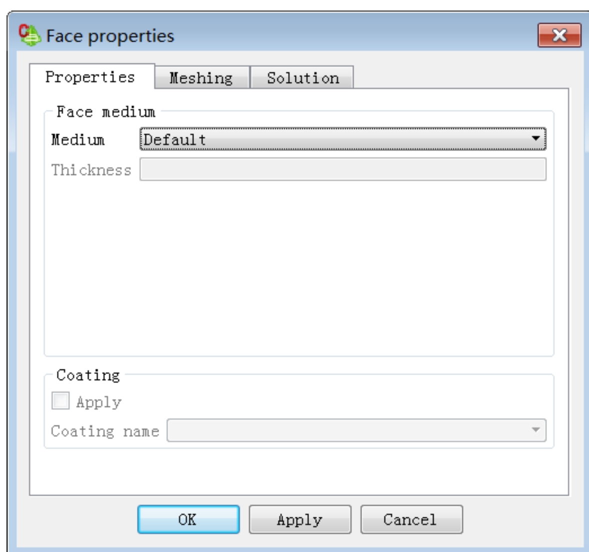


图 5-209 设置“Face medium”参数为“Default”

选择其余的面，并将其面属性的“Face medium”参数设置为“Perfect electric conductor”选项。

（6）设置局部剖分网格

“OuterDome”的外表面由于不是实际的几何区域，只是假设的“air”区域，因此其网格可以采用较粗的标准剖分。右键单击“OuterDome”的外表面，选择“Properties”选项，在“Face properties”对话框中的“Meshing”选项卡中勾选“Local mesh size”复选框，并在“Mesh size”文本框中输入“lambda/8”，即采用 1/8 空气波长的标准剖分，如图 5-210 所示。

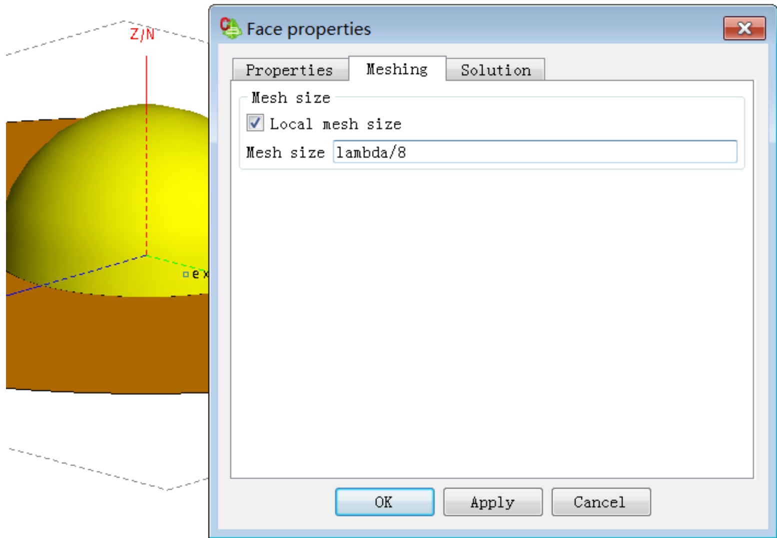


图 5-210　设置外球面的网格剖分标准设置为 1/8 波长

（7）设定 FEM modal 端口

在 3D 视图区域，把模型移动并缩放到适合的角度，单击鼠标左键自动切换到面选模式，选中同轴馈线的底部面元，单击鼠标右键，选择“Create port”→“FEM modal port”选项，如图 5-211 所示，弹出“Create FEM modal port (geometry)”对话框，进行如下设置。

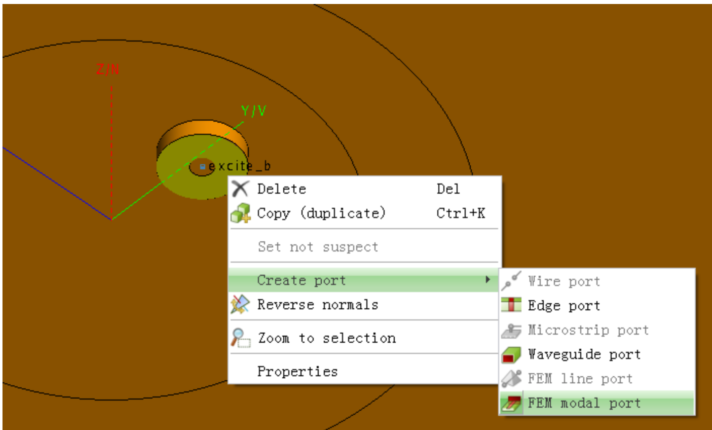


图 5-211　定义 FEM modal 端口

Label：Port1。

单击“Create”按钮，如图 5-212 所示。

（8）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，工作频率已经设置了。

（9）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“FEM modal source”选项，弹出“Add FEM modal source”对话框，进行如下设置。

Magnitude：1。

Phase：0。

Label：FEMModalSource1。

单击“Create”按钮，如图 5-213 所示。

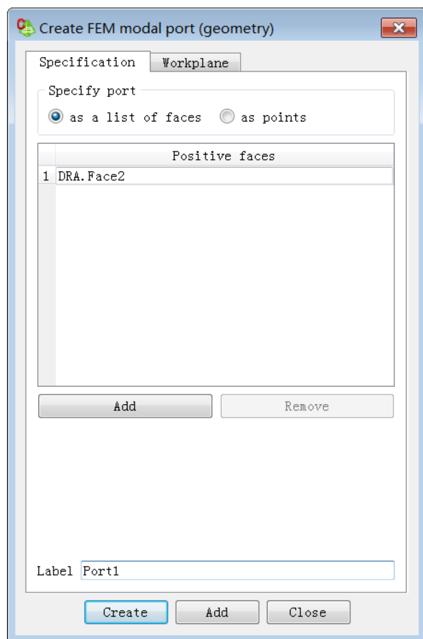


图 5-212 FEM modal 端口设置

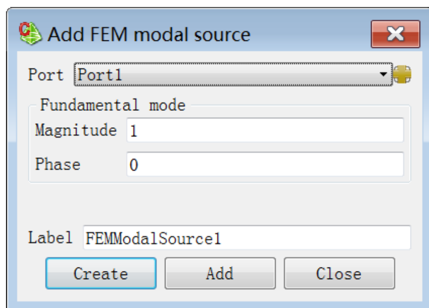


图 5-213 FEM modal 端口激励定义

（10）求解设置（保存已有设置不变）

（11）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Coarse。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-214 所示。

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（12）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

在 POSTFEKO 中，启动之后默认显示是 3D 视图方式。单击“Home”菜单中的“Add Model”按钮，选择“DRA_Finite_MoM.fek”，并把 MoM 方法计算的结果读进来。

显示 S11 结果。单击“Home”菜单中的“Cartesian”按钮，进入直角坐标系，单击“Source data”，选择“FEMModalSource1”以添加端口计算结果，如图 5-215 所示。在右侧面板中，勾选“dB”复选框。同样，再次选择“wgSource”计算的结果，并在右侧面板中，勾选“dB”复选框。

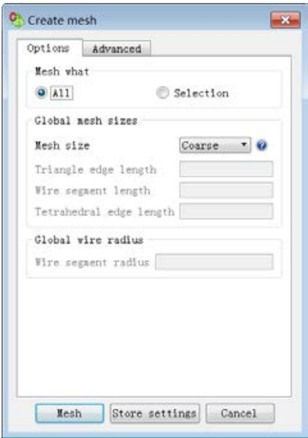


图 5-214　定义网格划分

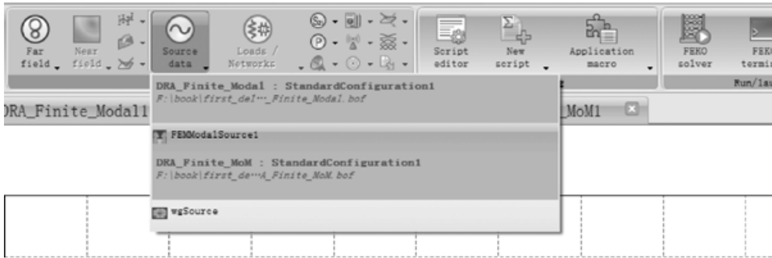


图 5-215　选择“FEMModalSource1”添加端口

FEM 与 MoM 计算端口的反射系数对比如图 5-216 所示。

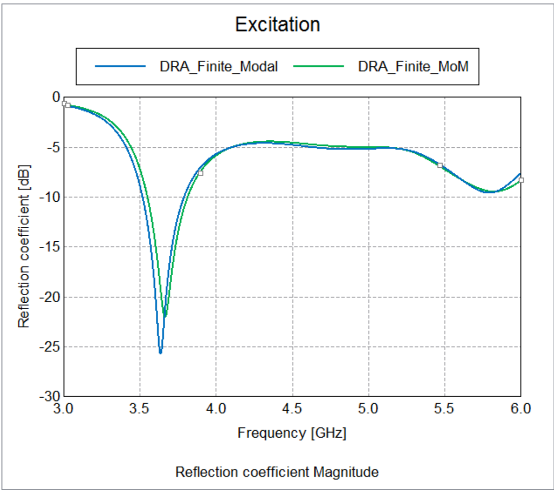


图 5-216　FEM 与 MoM 计算端口的反射系数对比

显示 2D 方向图。单击“Home”菜单中的“Polar”按钮，进入极坐标系，单击“Far field”按钮选择 FEM 计算的“ff_XZ”，在右侧面板中，将“Independent axis(Angular)”设为“Theta”选择频率为 3.6GHz，并勾选“dB”复选框。同样，再次选择 MoM 计算的“ff_XZ”，并在右侧面板中，选择频率为 3.6GHz，并勾选“dB”复选框。在右侧面板中选择曲线，并在“Format”菜单下的“Marker”中选择“Marker style”，为两条曲线设置不同的 Marker。图 5-217 所示是两种方法计算的 3.6GHz 频率下的方向图对比。

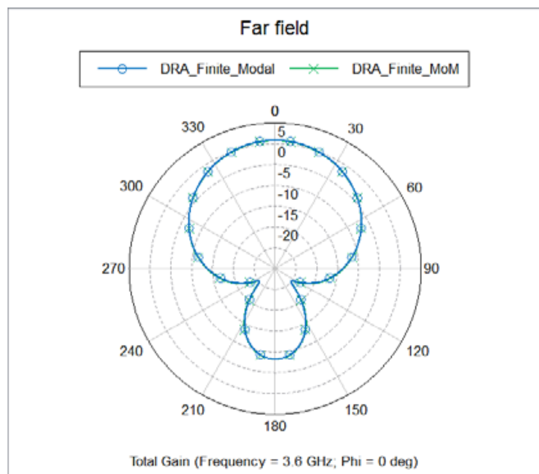


图 5-217　微带天线端口阻抗

5.8　波导缝隙天线

5.8.1　波导缝隙天线的设计背景

常见的缝隙天线是开在传输 TE10 模的矩形波导壁上的半波谐振缝隙。缝隙截断波导内壁表面电流线，表面电流的一部分绕过缝隙，另一部分以位移电流的形式沿原来方向流过缝隙，因而缝隙被激励，向外空间辐射电磁波。

为了增强天线的方向性，可以在波导的同一壁上按一定规律开多条尺寸相同的缝隙，形成波导缝隙天线阵列。波导缝隙天线有以下 3 种形式。

1）谐振式缝隙阵：其特点是相邻缝隙的间距等于 λ_g 或 $\lambda_g/2$（λ_g 为波导波长），各缝隙同相激励，在波导末端配置短路活塞。

2）非谐振式缝隙阵：非谐振式缝隙阵是对谐振式缝隙阵的间距变为小于 λ_g 或大于 λ_g，并把波段末端的短路活塞换成匹配负载。

3）匹配偏斜缝隙阵：是指将谐振式缝隙阵中的缝隙改为匹配缝隙，不在波导中产生反射波，末端短路活塞也换成匹配负载。缝隙匹配可通过适当选择缝隙对中线的偏移距离和倾斜角度实现。

对于波导缝隙天线，FEKO 可采用精确的全波方法计算，常用方法有 MLFMM。5.8.2 节

将详细介绍具体的仿真流程和方法。

5.8.2 基于多层快速多极子（MLFMM）的实现

启动 CADFEKO，新建一个工程“slotted_waveguide_MLFMM.cfx”。

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Millimetres(mm)”单选按钮，如图 5–218 所示。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中，双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=10e9。

单位缩放参数：sc=0.001。

工作波长：lam =c0/freq/sc。

波导内壁长：a=22.86。

波导内壁宽：b=10.16。

波导壁厚：t=1.27。

缝长（U 方向）：su=t+0.5。

缝高（N 方向）：sn=2.5。

lam_c=2*a。

波导波长：lam_g=lam/sqrt(1−(lam/lam_c)^2)。

缝隙间距：d=lam_g/2。

波导内下底面到原点的距离：lb=2.5*d+lam_g。

波导内上底面到原点的距离：lt=3*d。

缝与水平面夹角：alpha_1=20。

alpha_2=15。

alpha_3=12。

整体面剖分尺寸：tL0=min(lam/8,3*t)。

缝隙形成的小面剖分尺寸：tL1=min(tL0,1.5*t)，如图 5–219 所示。

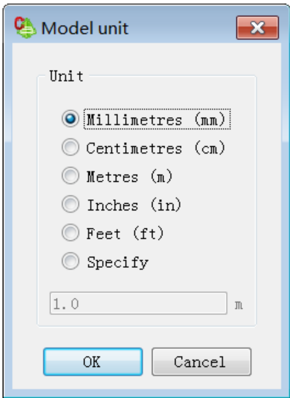


图 5–218 设置单位

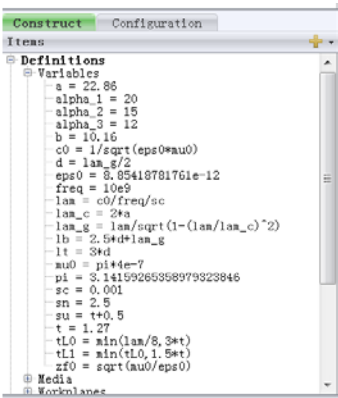


图 5–219 定义变量

（2）模型建立

在“Construct”菜单中单击“Cuboid”按钮，在弹出的“Create cuboid”对话框中建立矩形波导结构，设置如下。

Definition methods：Base corner, width, depth，height。

Base centre (C)：(U：−a/2, V：−b/2, N：−lb)。

Width(W)：a。

Depth(D)：b。

Height (H)：lb+lt。

Label：waveguide_i，如图 5-220 所示。

单击“Add”按钮，创建内部的波导结构。

Base centre (C)：(U：−a/2−t, V：−b/2−t, N：−lb−t)。

Width(W) ：a+2*t。

Depth(D)：b+2*t。

Height (H)：lb+lt+2*t。

Label：waveguide_o。

单击“Create”按钮，创建外部的波导结构，如图 5-221 所示。

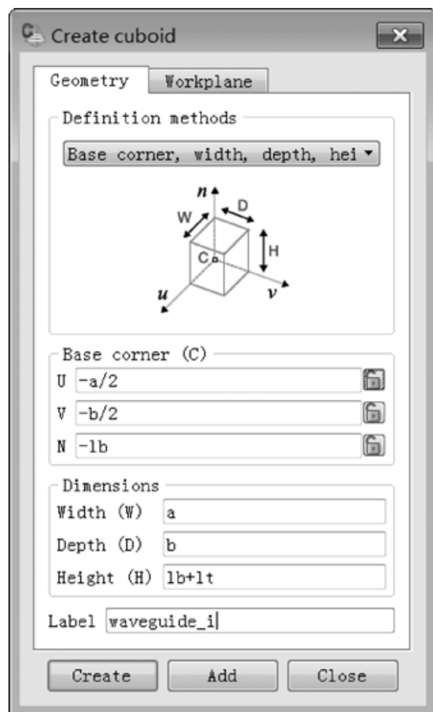


图 5-220　创建内部波导结构图

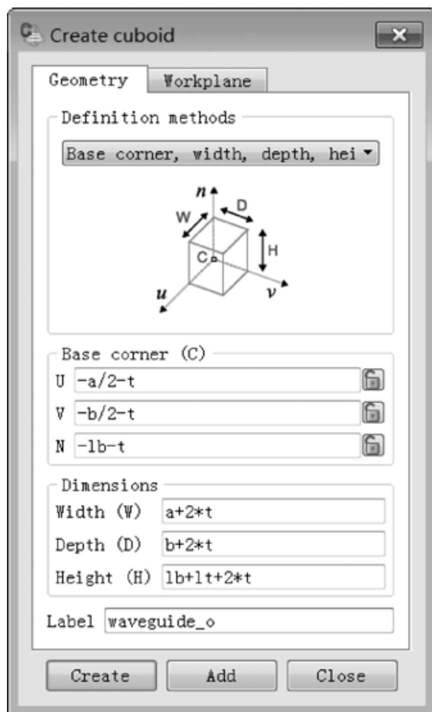


图 5-221　创建外部波导结构

选中创建的内部波导 waveguide_i，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Subtract from”选项，进行布尔减法运算。然后，选择 waveguide_o，将 waveguide_i 从 waveguide_o 中减掉。选择新生成的模型，单击鼠标右键，选择“Rename”选项，将新模型名称修改为“waveguide”。

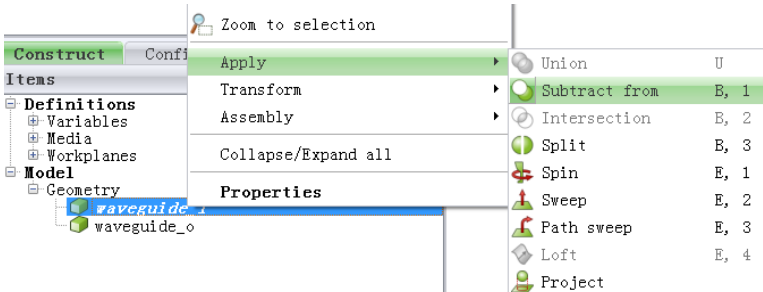


图 5-222　布尔减法运算创建波导模型

创建缝隙结构 slot_1：

在“Construct”菜单中单击“Cuboid”按钮，在弹出的“Create cuboid”对话框中建立缝隙结构，设置如下。

Definition methods：Base corner, width, depth，height。

Base centre (C)：(U：a/2−su+t, V：−b, N：−sn/2)。

Width(W)：su。

Depth(D)：2*b。

Height (H)：sn。

Label：slot_1。

单击“Create”按钮，创建缝隙结构，如图 5-223 所示。

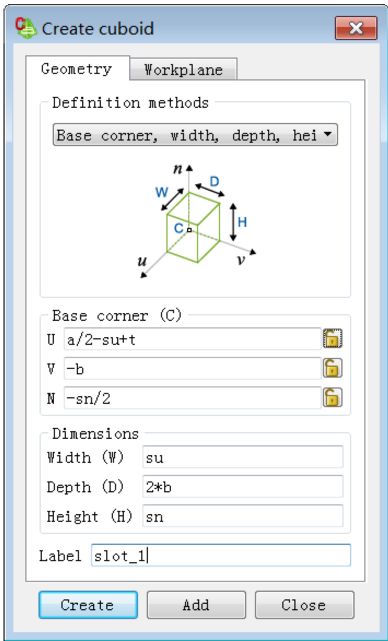


图 5-223　创建 slot1

对 slot_1 进行旋转并平移，选择几何结构“slot_1”，单击鼠标右键，选择“Transform”→“Rotate”选项，如图 5-224 所示，打开“Rotate”对话框，进行如下设置。

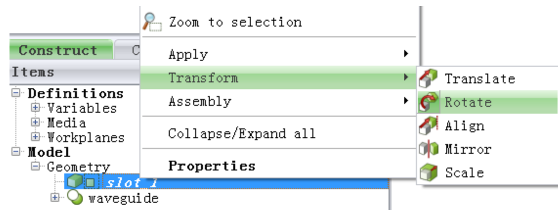


图 5-224　选择“Rotate”选项

Origin：(U：a/2,V：0, N：0)。

Axis direction：(U：1, V：0, N：0)。

Rotation angle。

Angle [degrees]：alpha_1。

单击“OK”按钮，完成对 slot_1 的旋转。再选择几何结构“slot_1”，单击鼠标右键，选择“Transform”→“Translate”选项，在打开的“Translate”对话框中进行如下设置。

From：(U：0, V：0, N：0)。

To：(U：0, V：0, N：d/2)。

单击“OK”按钮即完成对 slot_1 的平移，如图 5-226 所示。

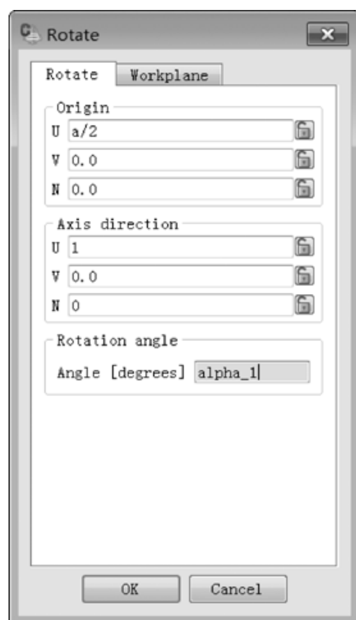


图 5-225　完成平移 slot_1

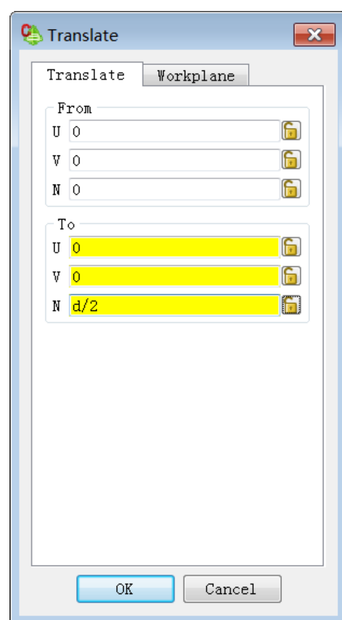


图 5-226　完成旋转 slot_1

创建 slot_2。选择几何 slot_1，单击鼠标右键并选择“Copy(duplicate)”选项，将复制好的新模型命名为“slot_2”。选中 slot_2，在“Details”中选择“Transforms”，按照图 5-227 和图 5-228 先双击“Rotate1”修改参数：（Angle [degrees]：-alpha_1），单击“OK”按钮；其次双击“Translate1”修改参数：（To：(U：0，V：0，N：-d/2)），单击“OK”按钮，完成 slot_2 的创建。

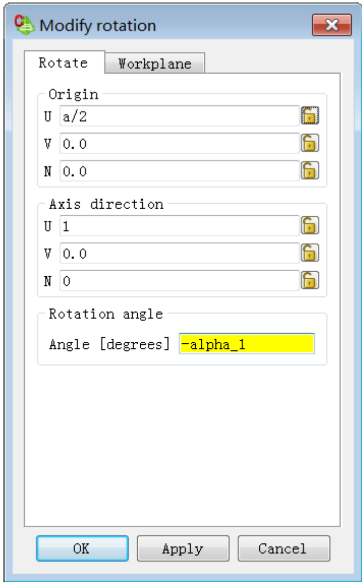


图 5-227　缝隙 slot_2 创建（修改旋转）

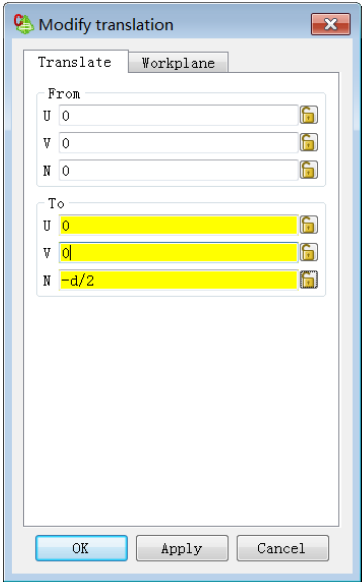


图 5-228　缝隙 slot_2 创建（修改平移）

创建 slot_3。选择几何 slot_1，单击鼠标右键并选择“Copy(duplicate)”选项，将复制好的新模型命名为“slot_3”。选中 slot_3，在“Details”中选择“Transforms”，按照图 5-229 和图 5-230 先双击“Rotate1”修改参数：（Angle [degrees]：-alpha_2），单击“OK”按钮；其次双击“Translate1”修改参数：（To：(U：0，V：0，N：1.5*d)），单击“OK”按钮完成 slot_3 的创建。

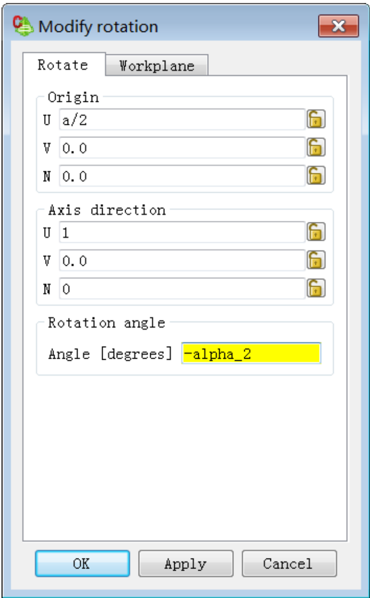


图 5-229　缝隙 slot_3 创建（修改旋转）

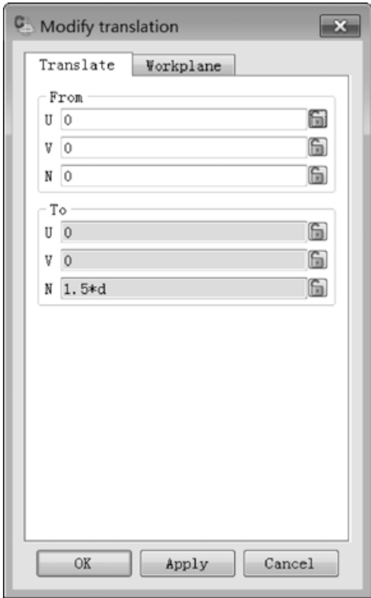


图 5-230　缝隙 slot_3 创建（修改平移）

创建 slot_4。选择几何 slot_1，单击鼠标右键并选择“Copy(duplicate)”选项，将复制好的新模型命名为“slot_4”。选中 slot_4，在“Details”中选择“Transforms”，按照图 5-231 和图 5-232 所示，先双击“Rotate1”修改参数：（Angle [degrees]：alpha_2），单击“OK”按钮；其次双击

“Translate1”修改参数：（To：(U：0，V：0，N：−1.5*d)），单击“OK”按钮完成 slot_4 的创建。

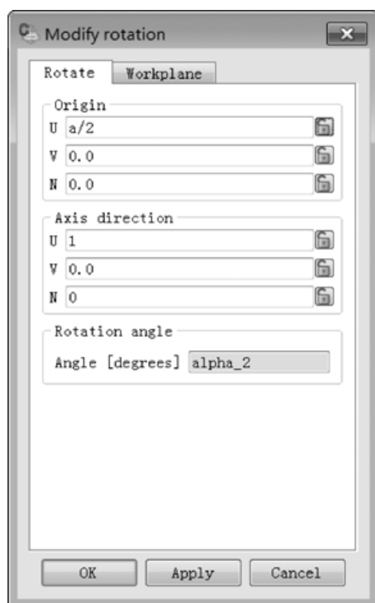


图 5-231　缝隙 slot_4 创建（修改旋转）

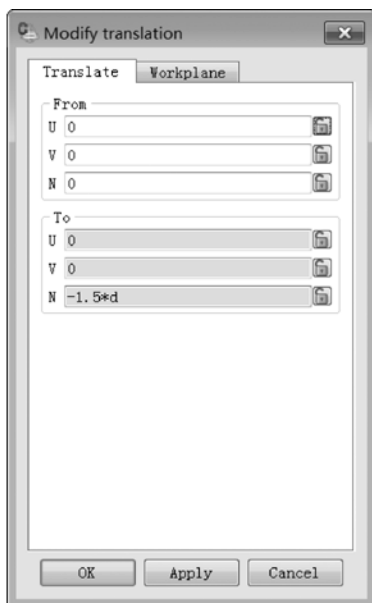


图 5-232　缝隙 slot_4 创建（修改平移）

创建 slot_5。选择几何 slot_1，单击鼠标右键并选择“Copy(duplicate)”选项，将复制好的新模型命名为“slot_5”。选中 slot_5，在“Details”中选择“Transforms”，按照图 5-233 和图 5-234 所示，先双击“Rotate1”修改参数：（Angle [degrees]：alpha_3），单击“OK”按钮；其次双击“Translate1”修改参数：（To：(U：0，V：0，N：2.5*d)），单击“OK”按钮完成 slot_5 的创建。

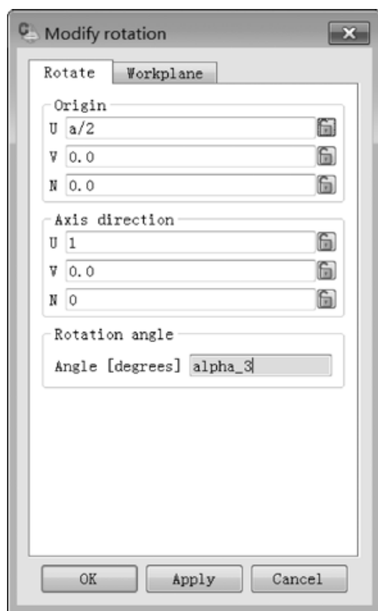


图 5-233　缝隙 slot_5 创建（修改旋转）

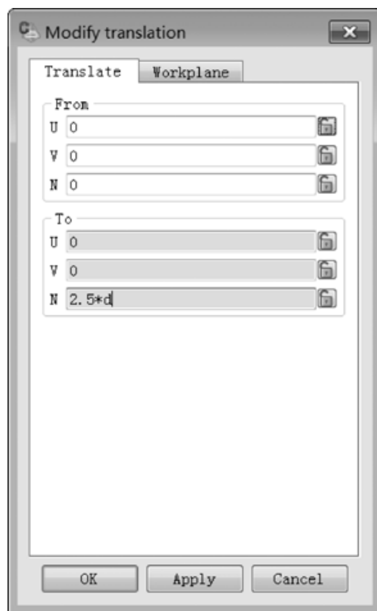


图 5-234　缝隙 slot_5 创建（修改平移）

创建 slot_6。选择几何 slot_1，单击鼠标右键并选择“Copy(duplicate)”选项，将复制好的新模型命名为“slot_6”。选中 slot_6，在“Details”中选择“Transforms”，按照图 5-235 和图 5-236 所示，先双击“Rotate1”修改参数：（Angle [degrees]：-alpha_3），单击“OK”按钮；其次双击“Translate1”修改参数：（To：(U：0，V：0，N：-2.5*d)），单击“OK”按钮，完成 slot_6 的创建。

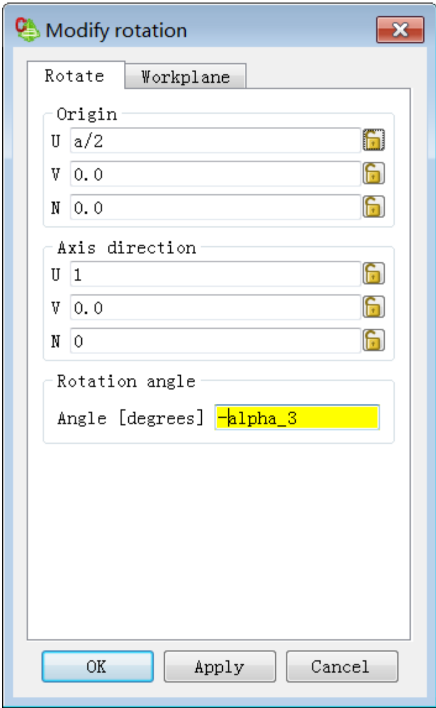


图 5-235　缝隙 slot_6 创建（修改旋转）

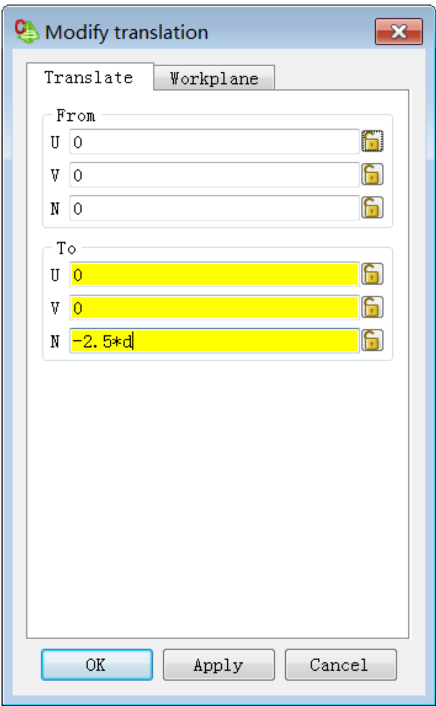


图 5-236　缝隙 slot_6 创建（修改平移）

鼠标选中所有的缝隙模型 slot_1～slot_6，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Subtract from”选项，进行布尔减法运算。然后选择 waveguide，将新的模型重新命名为“slotted_waveguide”。在“Details”中选择“Regions”结点下的 Region，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，如图 5-237 所示，将此模型的“Region medium”参数修改为“Free space”，如图 5-238 所示。

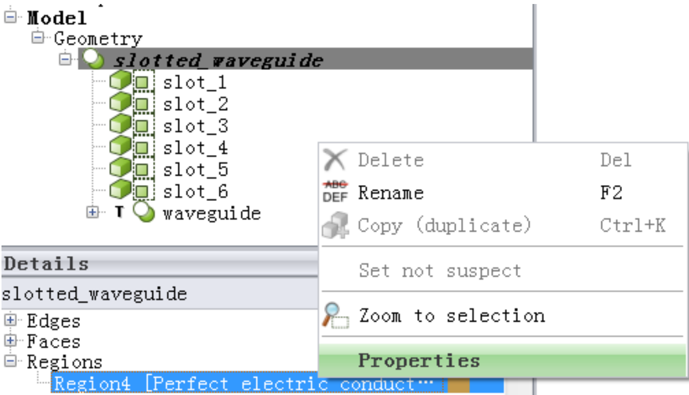


图 5-237　选择“slotted_waveguide”的“Region”

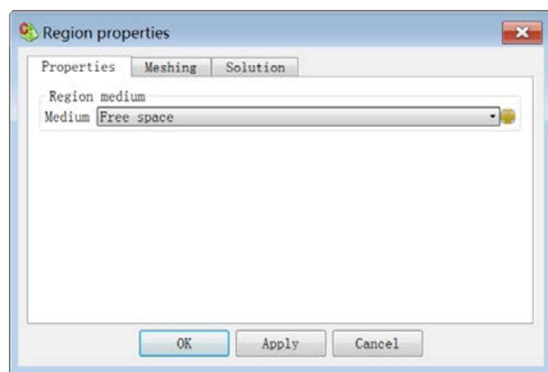


图 5-238 修改模型的“Region medium”参数为“Free space”

对于波导缝隙边缘的面，需要更为精细的网格。将右下角的“Selection type”修改为“Faces”，如图 5-239 所示。按住〈Ctrl〉键，逐个选择波导缝隙上的面（见图 5-240），单击鼠标右键，选择“Properties”选项，如图 5-241 所示。打开“Face properties”对话框，在“Meshing”选项卡中勾选“Local mesh size”复选框，设置“Mesh size”为“tL1”，如图 5-242 所示。

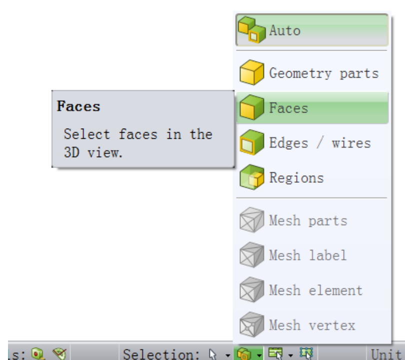


图 5-239 修改“Selection type”为“Faces”

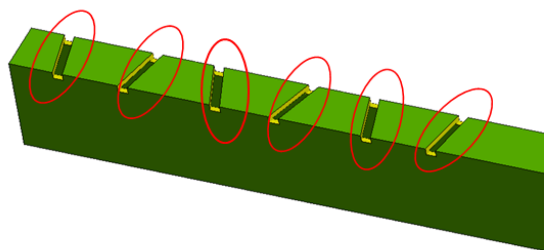


图 5-240 选择波导缝隙处的面

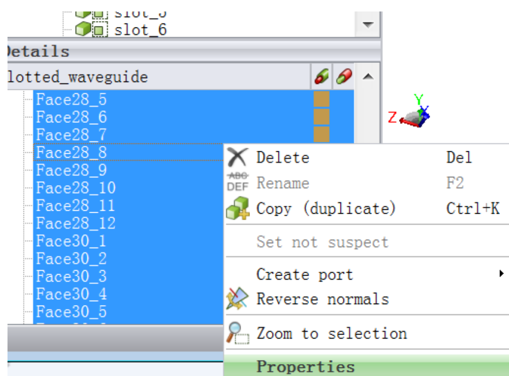


图 5-241 单击鼠标右键并选择“Properties”选项

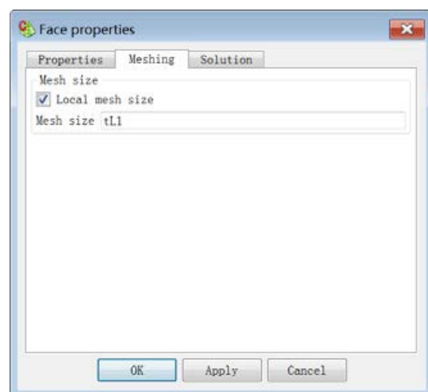


图 5-242 设置局部网格剖分规则

（3）创建波导端口

在“Display options”菜单中单击“Cutplanes”按钮，在弹出的对话框中，在“Set to plane”区域内单击“Global ZX”按钮，再单击“OK”按钮，如图 5-243 所示。

选择图 5-244 所示的面，即 Z=-lb 的面元，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，设置“Local mesh size”为“lam/12.5”。

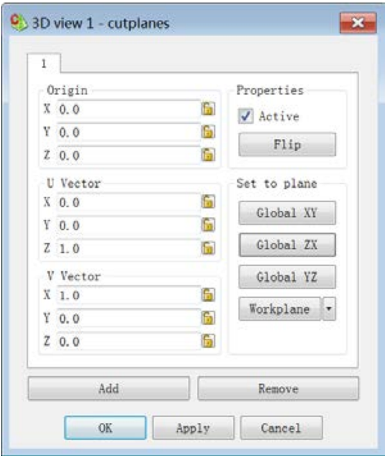


图 5-243　设置 cutplanes

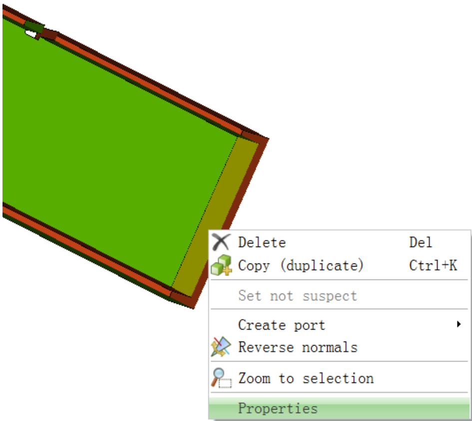


图 5-244　设置馈电端口面的局部网格剖分

再次选择图 5-244 所示的面，即 Z=-lb 的面元，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Waveguide port”选项，注意保证波导端口的面朝模型里面传输（可勾选“Propagation direction opposite to normal”复选框进行调整）。单击”Create”按钮，创建波导端口，如图 5-245 所示。

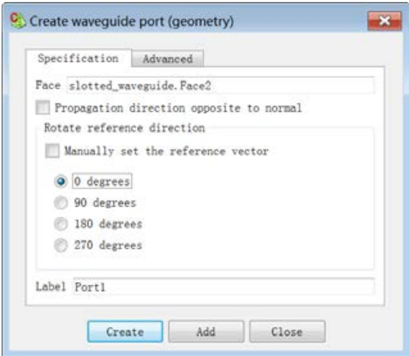


图 5-245　创建波导端口

（4）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选中：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

（5）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Waveguide source”选项，弹出“Add waveguide source”对话框，进行如下设置。

选中：Excite fundamental mode only。

Fundamental mode。

Magnitude：1。

Phase：0。

Rotation：0。

Label：WaveguideSource1。

单击“Create”按钮，如图 5-246 所示。

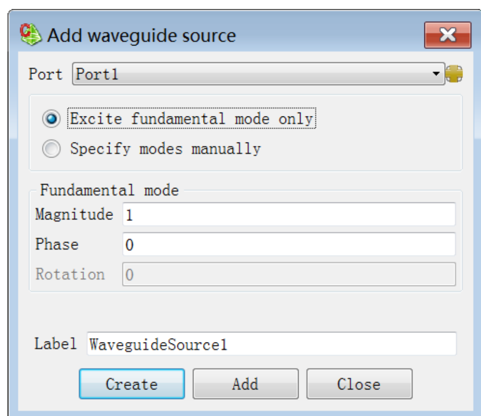


图 5-246　定义端口激励“WaveguideSource1”

（6）求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮。

theta 的 Increment：1。

Phi 的 Increment：1。

Label：ff_3d。

单击“Create”按钮，如图 5-247 所示。

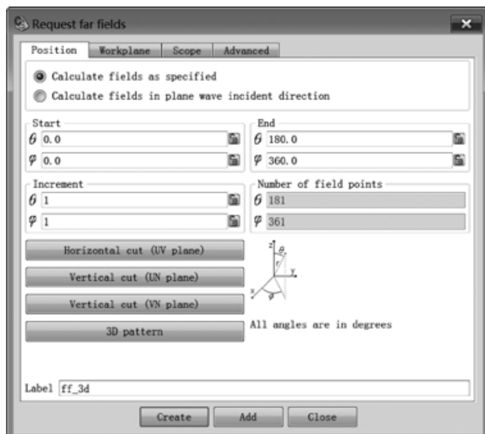


图 5-247　远场方向图求解设置（3D pattern）

（7）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

Triangle edge length：tL0。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-248 所示。

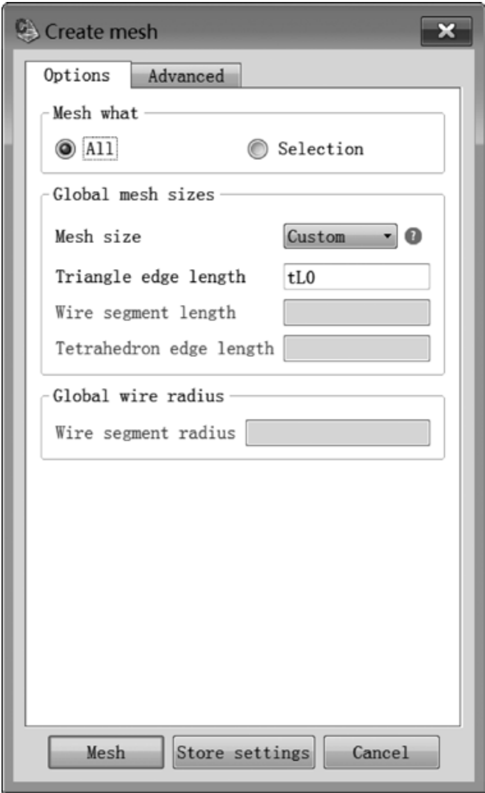


图 5-248　定义网格划分

进入“Solve/Run”菜单，单击“Solver settings”按钮，在“MLFMM/ACA”选项卡下选择“Solver model with multilevel fast multipole method (MLFMM)”以激活多层快速多极子选项。单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（8）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

（9）显示 3D 结果

在“Home”菜单中，单击“Far field”→“ff_3D”，在右侧控制面板中勾选“dB”复选框。进入“Result”菜单，单击“Grid”按钮关闭网格。这时，得到的 3D 显示效果如图 5-249 所示。

（10）显示 2D 结果

切换到“Home”菜单，在“Create new display”中单击“Polar”，进入极坐标系“Polar

Graph1”，单击“Far field”→“ff_3d”。在控制面板中设置“Independent axis (Angular)”为“Theta(wrapped)”，并勾选“dB”复选框，如图 5-250 所示。

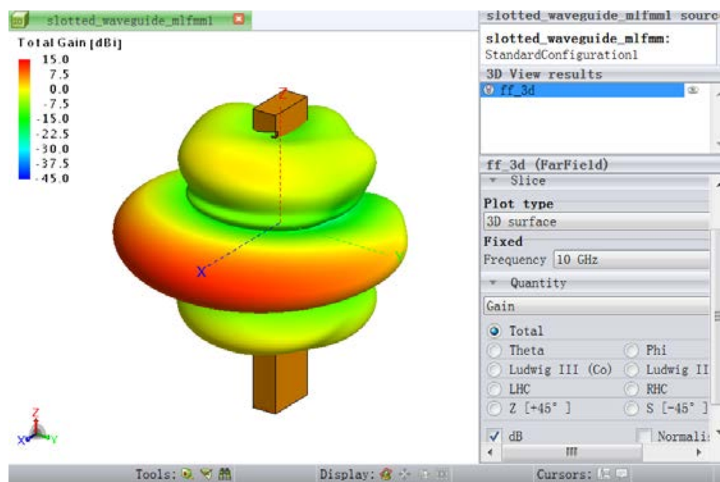


图 5-249　波导缝隙天线三维方向图

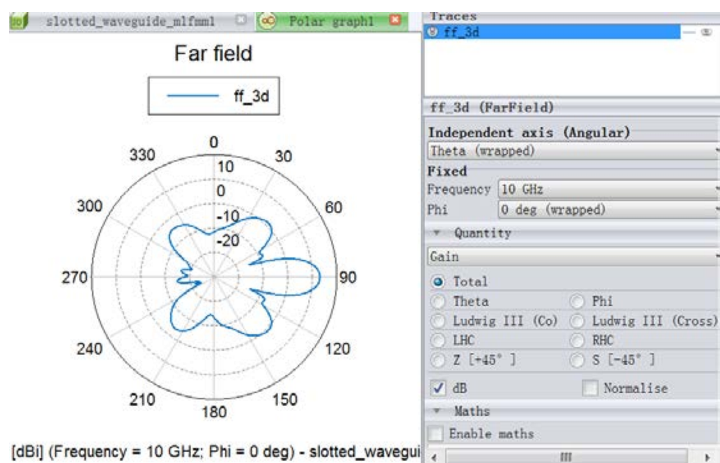


图 5-250　波导缝隙天线二维切面增益方向图

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“slotted_waveguide_MLFMM.pfs”，关闭 POSTFEKO 即可。

5.9　相控阵天线

5.9.1　相控阵天线的设计原理

相控阵天线是阵列天线的一种，也称为电子扫描阵列天线。相控阵天线依靠控制阵列天线中辐射单元的馈电相位及幅度来实现天线波束指向在空间扫描，同时可以控制副瓣电平、最小

值位置和方向图的形状。应用于相控阵雷达的相控阵天线有多种，相控阵天线均由多个天线单元组成，天线单元可以是喇叭天线、偶极子天线、微带贴片天线等。相控阵中的移相器，用来改变单元之间信号的相位关系，各辐射单元输入信号的幅度可以通过功率分配网络来控制。相比传统的机械扫描天线，惯性大、速度慢等缺点，相控阵天线可以实现波束的快速变化。

对于相控阵天线的仿真，需要对实现不同相位/幅度加权进行多次仿真。当天线单元较多时，在 GUI 界面中逐一添加不同的相位/幅度工作量巨大。FEKO 提供的脚本编辑模块 EDITFEKO 可采用脚本方式快速实现对大量天线单元激励的不同相位/幅度的自动控制，减少软件操作的工作量。下面以一个线性偶极子相控阵为例，介绍 EDITFEKO 在相控阵天线分析中的应用。

5.9.2 EDITFEKO脚本控制的仿真实现

下面先进行模型描述，示意图如图 5-251 所示。

工作频率：freq=1GHz。

天线：采用 51 源偶极子组成的偶极子阵列（垂直极化放置）。

天线振子长度：0.45×lam，沿 X 方向平行排列。

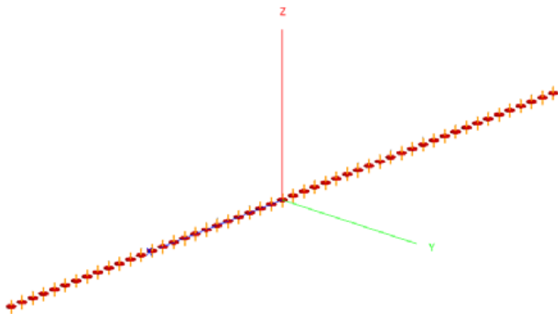


图 5-251 阵列的模型示意图

天线阵列单元排布规律参见文本格式文件“../chapter05/app5/5.9/started/arrayLayout.inc”，如图 5-252 所示。

```
#        X                Y                  Z
-3.67245761E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-3.52555931E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-3.37866100E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-3.23176270E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-3.08486439E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-2.93796609E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-2.79106778E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-2.64416948E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-2.49727118E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-2.35037287E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-2.20347457E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-2.05657626E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-1.90967796E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-1.76277965E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-1.61588135E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-1.46898304E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-1.32208474E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-1.17518644E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-1.02828813E+00 0.00000000E+00  0.00000000E+00
-8.81389827E-01 0.00000000E+00  0.00000000E+00
```

图 5-252 天线阵列各单元的位置（X 坐标、Y 坐标、Z 坐标），第 1 行是注释

天线阵列单元的激励幅度和相位参见文本格式文件“../chapter05/app5/5.9/started/Mag_phase.inc”，如图 5-253 所示。

#Phase	0deg	5deg	10deg	15deg	30deg	45deg	60deg
#Magnitude	Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	Phase
1.54604553E-01	-2.70025701E-13	-3.84356826E+02	-7.65788464E+02	-1.14139199E+03	-2.20500000E+03	-3.11834091E+03	-3.81917203E+03
3.59633084E-01	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00
6.42881606E-02	-1.08010280E-14	-1.53742730E+01	-3.06315385E+01	-4.56556796E+01	-8.82000000E+01	-1.24733636E+02	-1.52766881E+02
6.96894845E-02	-2.16020561E-14	-3.07485460E+01	-6.12630771E+01	-9.13113591E+01	-1.76400000E+02	-2.49467272E+02	-3.05533762E+02
7.51444646E-02	-3.24030841E-14	-4.61228191E+01	-9.18946156E+01	-1.36967039E+02	-2.64600000E+02	-3.74200909E+02	-4.58300644E+02
8.06265450E-02	-4.32041122E-14	-6.14970921E+01	-1.22526154E+02	-1.82622718E+02	-3.52800000E+02	-4.98934545E+02	-6.11067525E+02
8.61083188E-02	-5.40051402E-14	-7.68713651E+01	-1.53157693E+02	-2.28278398E+02	-4.41000000E+02	-6.23668181E+02	-7.63834406E+02
9.15617212E-02	-6.48061682E-14	-9.22456381E+01	-1.83789231E+02	-2.73934077E+02	-5.29200000E+02	-7.48401817E+02	-9.16601287E+02
9.69582291E-02	-7.56071963E-14	-1.07619911E+02	-2.14420770E+02	-3.19589757E+02	-6.17400000E+02	-8.73135453E+02	-1.06936817E+03
1.02269068E-01	-8.64082243E-14	-1.22994184E+02	-2.45052308E+02	-3.65245436E+02	-7.05600000E+02	-9.97869090E+02	-1.22213505E+03
1.07465429E-01	-9.72092524E-14	-1.38368457E+02	-2.75683847E+02	-4.10901116E+02	-7.93800000E+02	-1.12260273E+03	-1.37490193E+03
1.12518684E-01	-1.08010280E-13	-1.53742730E+02	-3.06315385E+02	-4.56556796E+02	-8.82000000E+02	-1.24733636E+03	-1.52766881E+03
1.17400555E-01	-1.18811308E-13	-1.69117003E+02	-3.36946924E+02	-5.02212475E+02	-9.70200000E+02	-1.37207000E+03	-1.68043569E+03
1.22083395E-01	-1.29612336E-13	-1.84491276E+02	-3.67578462E+02	-5.47868155E+02	-1.05840000E+03	-1.49680363E+03	-1.83320257E+03
1.26540590E-01	-1.40413365E-13	-1.99865549E+02	-3.98210001E+02	-5.93523834E+02	-1.14660000E+03	-1.62153727E+03	-1.98596946E+03
1.30746253E-01	-1.51214393E-13	-2.15239822E+02	-4.28841540E+02	-6.39179514E+02	-1.23480000E+03	-1.74627091E+03	-2.13873634E+03
1.34675117E-01	-1.62015421E-13	-2.30614095E+02	-4.59473078E+02	-6.84835193E+02	-1.32300000E+03	-1.87100454E+03	-2.29150322E+03
1.38304753E-01	-1.72816449E-13	-2.45988368E+02	-4.90104617E+02	-7.30490873E+02	-1.41120000E+03	-1.99573818E+03	-2.44427010E+03
1.41615238E-01	-1.83617477E-13	-2.61362641E+02	-5.20736155E+02	-7.76146552E+02	-1.49940000E+03	-2.12047182E+03	-2.59703698E+03
1.44584791E-01	-1.94418505E-13	-2.76736914E+02	-5.51367694E+02	-8.21802232E+02	-1.58760000E+03	-2.24520545E+03	-2.74980386E+03

图 5-253　天线阵列各单元的幅度和相位（幅度、相位组合 1、相位组合 2…），第 1 行描述的是主瓣指向角度，它与第 2 行均为注释行

上述两个文件中单元的幅度和相位排布要和坐标位置排列对应，如单元位置文件的第 2 行描述的是端口 1，在单元激励幅度与相位文件的第 2 行对应的就是端口 1 对应的激励和相位。

该例子中，天线阵列单元排布规律文件的坐标值是以 m 为单位给定的，所以在 CADFEKO 中建模时，也以 m 为单位。

天线单元的复制和激励的添加均在 EDITFEKO 中完成，下面介绍具体步骤。

启动 CADFEKO，新建一个工程“dipole_array.cfx”。

（1）定义变量

在左侧的树形浏览器中，双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=1e9。

工作波长：lam=c0/freq。

（2）建立天线模型

在“Construct”菜单中，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，如图 5-254 所示。定义线段的起始点坐标：Start Point (U：0.0，V：0，N：−lam*0.225)；End point (U：0.0，V：0.0，N：lam*0.225)；Label：dipole；单击“Create”按钮。

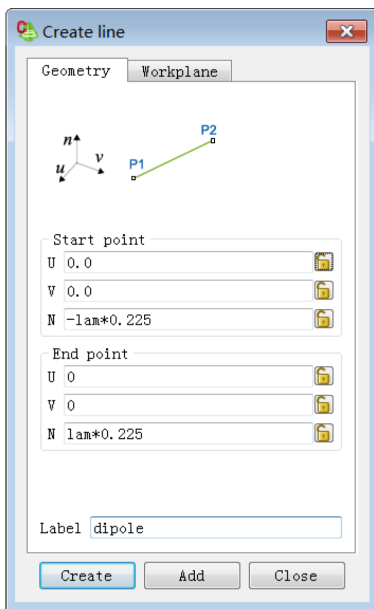


图 5-254　天线单元模型的建立

（3）天线端口设置

在左侧的树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，选中新建的模型“dipole”，在左下角的“Details”中展开“Wires”结点，选择“Wire1”（在 EDITFEKO 中进行模型的复制平移-TG 的时候要应用该名称，保证 CadFEKO 与 EditFEKO 的一致性），单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，在弹出的“Create wire port(geometry)”对话框中，将“Location on wire”设置为“Middle”，在“Label”文本框中输入“Port1”（该端口的编号也与 EDITFEKO 中应用端口复制平移 TG 命令用到的编号对应），单

击“Create”按钮，如图 5-255 所示。

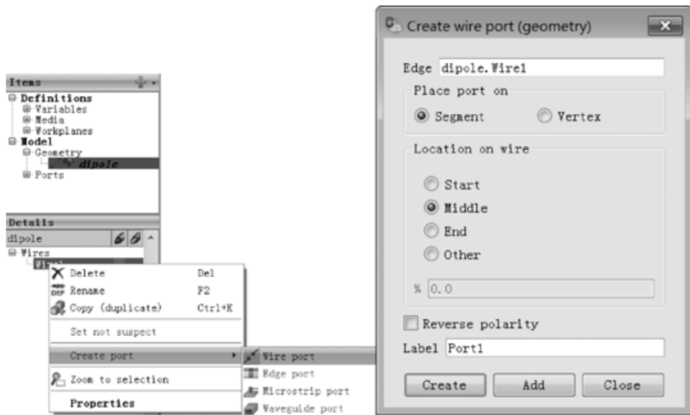


图 5-255　端口的定义

（4）电参数与求解设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选中：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

（5）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Voltage Source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 5-256 所示。

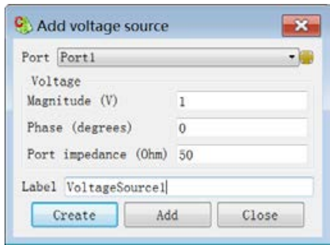


图 5-256　设置电压源激励

（6）辐射远场设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮，修正步长“Increment”中 Theta 的值为 1、Phi 的值为 1，在“Label”文本框中输入“ff3D”，单击“Add”按钮，如图 5-257 所示，继续设置。

单击“Horizontal cut (UV plane)”按钮，设置如下。

Start：(θ：90; φ：0)。

End：(θ：90; φ：180)。

修正步长“Increment”：Theta 的值为 0、Phi 的值为 0.5。

Label：ffXOY。

单击“Create”按钮，如图 5-258 所示。

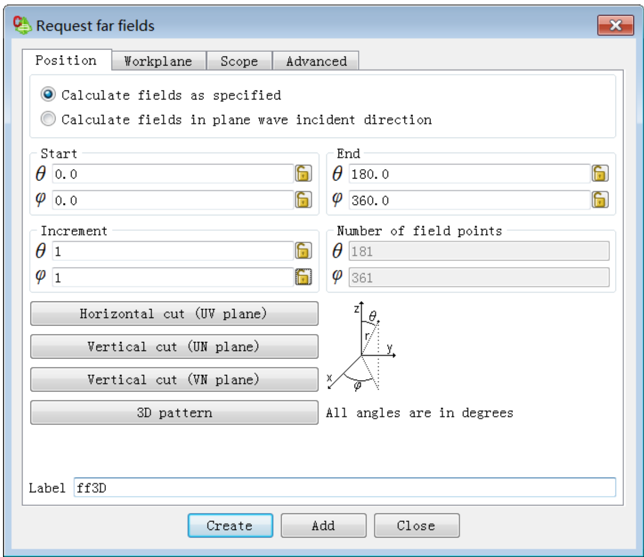


图 5-257　设置 3D 远场

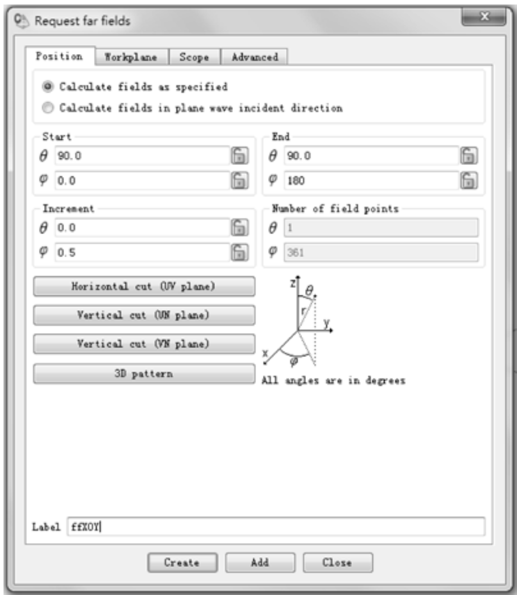


图 5-258　设置 XOY 面的远场

（7）求解方法设置

采用默认的矩量法，不需要进行设置。

（8）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

线段剖分单元长度“Wire segment length”：lam/15。

线段剖分单元半径：“Wire segment radius”：lam/80。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 5-259 所示。

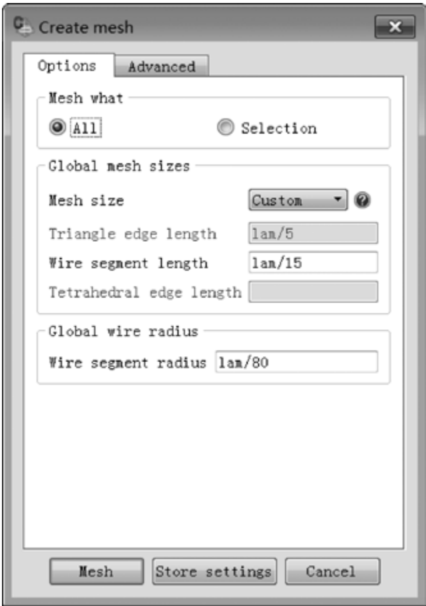


图 5-259　网格划分设置

（9）阵列的生成

由于阵列的单元（51 个）比较多，因此在 CADFEKO 中为每个单元设定端口和激励效率相对比较低。由于阵列的单元尺寸是相同的，因此可以在 EDITFEKO 中通过循环来快速生成阵列，并完成对端口激励信号的快速定义。为了保持 CADFEKO 与 EDITFEKO 设置的一致性（只满足 CADFEKO→EDITFEKO 的单向性，EDITFEKO 的设置无法返回到 CADFEKO），在进入 EDITFEKO 界面时，可以锁定 CADFEKO 中的求解设置，操作如下：

在 CADFEKO 中，先保存工程文件，单击“Solve/Run”菜单中的“EDITFEKO”按钮，启动 EDITFEKO，弹出“Disable CADFEKO solution configuration?”对话框，如图 5-260 所示，单击“Yes”按钮即可进入 EDITFEKO 界面。

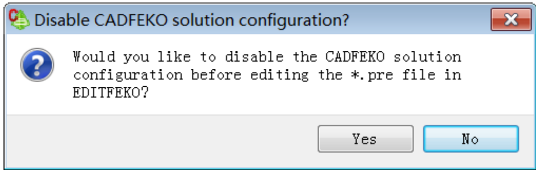


图 5-260　选择是否锁定 CADFEKO 的求解设置

每一个工程文件都会对应一个脚本文件（扩展名为.pre），该工程自动生成的脚本如图 5-261 所示，可以发现在该脚本中包含了计算方法、材料设置、求解设置、激励、计算远

场等全面信息。接下来需要在 IN 函数下边写循环生成天线阵列，采用的 TG 函数可用来复制、平移或旋转天线单元，在 Sources 部分写循环来对端口进行信号加载（如幅度和相位）。

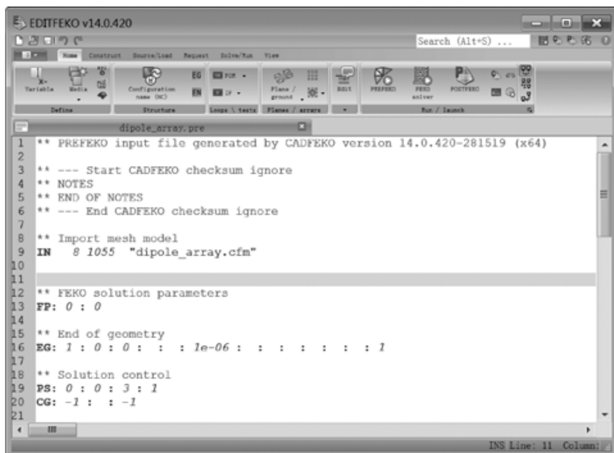


图 5-261 EDITFEKO 自动生成的命令行

EDITFEKO 修改 1：把如下脚本（或从附带的脚本文件…/chapter05/app5/5.9/started/array Generation.txt 中复制）复制到 IN 函数的下边。

```
** Generate the array
!!for #i=1 to 50
#x=fileread("arrayLayOut.inc",#i+1,1)
#y=fileread("arrayLayOut.inc",#i+1,2)
#z=fileread("arrayLayOut.inc",#i+1,3)
TG: 1 : dipole.wire1 : dipole.wire1 : #i : 2 :  :  :  : #x : #y : #z
TG: 1 : dipole.wire1.port1 : dipole.wire1.port1 : #i: 2 :  :  :  : #x : #y : #z
!!next
```

复制后，EDITFEKO 中的脚本如图 5-262 所示。

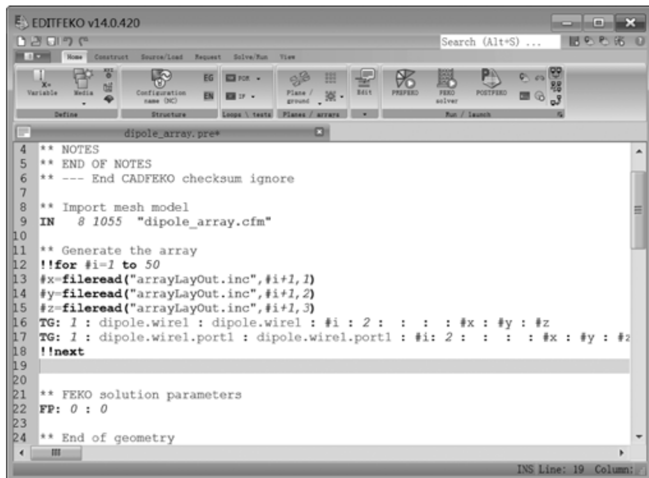


图 5-262 添加完天线阵列复制代码之后的 EDITFEKO 显示

说明：函数 fileread( )实现从某文件中（如“arrayLayOut.inc”）读取某行、某列的数值，“#x=fileread("arrayLayOut.inc",#i+1,1)”是从文件“arrayLayout.inc”中读取第 i+1 行、1 列的数据赋给 x 变量。

最后，在 EDITFEKO 中保存修改即可。

EDITFEKO 修改 2：把光标定在“Sources”下边，把 A1 一行注释掉，即在 A1 前边添加“**”（或把光标定在 A1 这一行，按〈Alt+C〉快捷键来完成注释，〈Alt+T〉快捷键是取消注释）。把光标定在 FR 命令行的下边，同时选中 NC 命令行和 DA 命令行，按〈Alt+C〉快捷键，把这两行也注释掉，如图 5-263 所示。

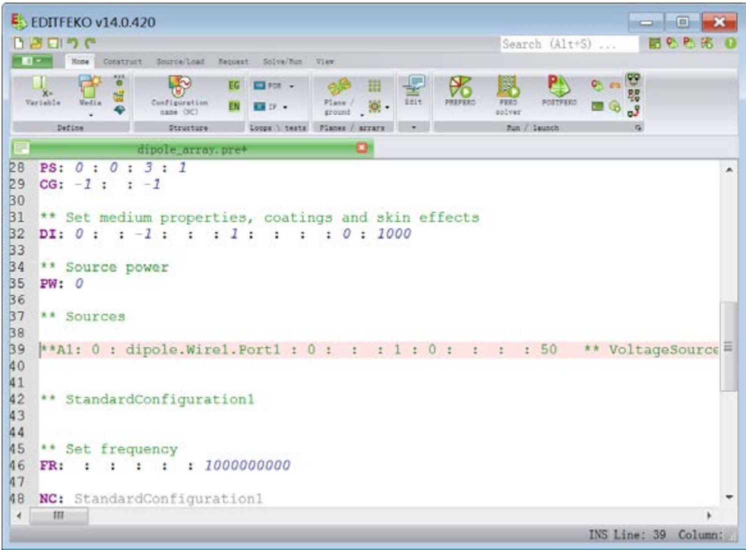


图 5-263　注释部分代码之后的 EDITFEKO 显示

把如下脚本复制到 FR 命令行的下边（或从附带的脚本文件…/chapter05/app5/5.9/started/arraySource.txt 中复制）。

```
!!for #j=1 to 7     ** for the no of the phase
NC：StandardConfiguration_#j
!!for #i=1 to 51 ** for the calculation of each pase combination
#Source_Mag=fileread("Mag_phase.inc",#i+2,1)
#Source_Phase=fileread("Mag_phase.inc",#i+2,#j+1)
!!if #i=1 then
A1：0 ：dipole.Wire1.Port#i ：0 ：  ：  ：#Source_Mag ：#Source_Phase ：  ：  ：  ：50    **
VoltageSource1
!!else
A1：1 ：dipole.Wire1.Port#i ：  ：  ：  ：#Source_Mag ：#Source_Phase ：  ：  ：  ：50    **
VoltageSource#i
!!endif
!!next
```

修改后的 EDITFEKO 脚本如图 5-264 所示。

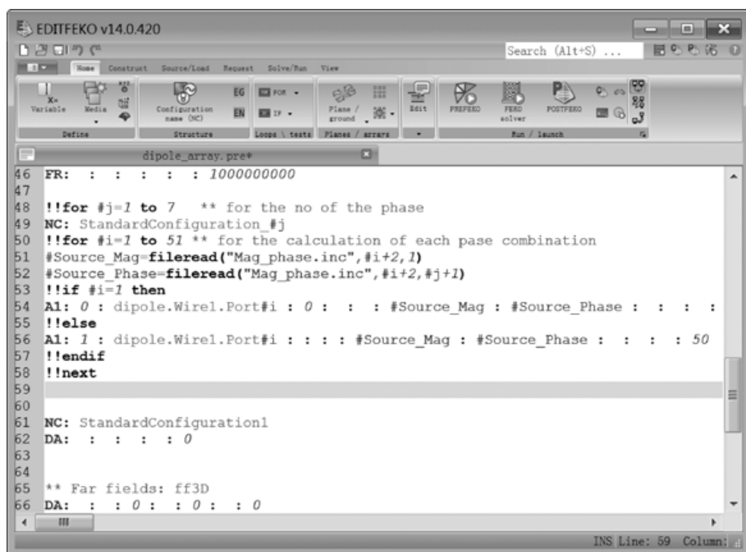


图 5-264　添加循环实现信号的加载

EDITFEKO 修改 3：把光标定在 EDITFEKO 的最后一行 EN 命令的上边（包括注释行“**End of file”），添加一行命令“!!next”，该命令是为了和图 5-264 中的第 1 组“!!for”循环对应，修改后的 EDITFEKO 如图 5-265 所示。

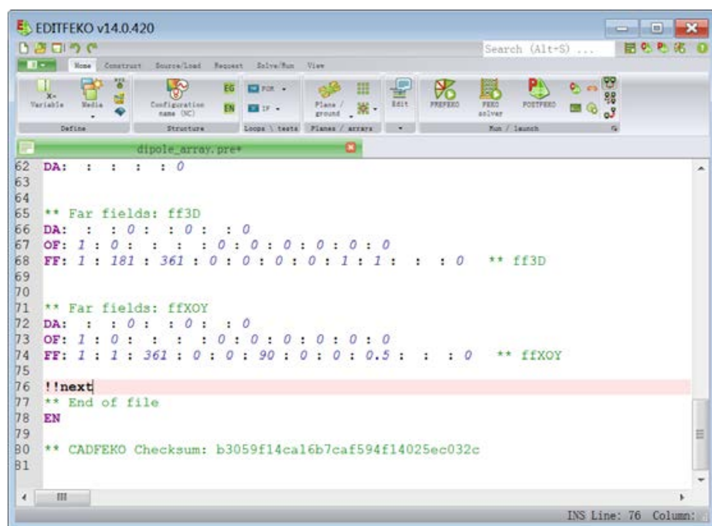


图 5-265　添加“for”循环终止行的代码“Next”

最后，在 EDITFEKO 中保存修改即可。

（10）预处理并提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“PREFEKO”按钮，检查有无错误，无误之后，可以单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮来提交计算（也可以关闭 EDITFEKO，在 CADFEKO 中提交计算，效果是一样的），在这里采用在 EDITFEKO 中提交计算。

（11）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。如图 5-266 所示，在 POSTFEKO 中列出了 6 种“Configuration”，每个 Configuration 对应一种相位组合。

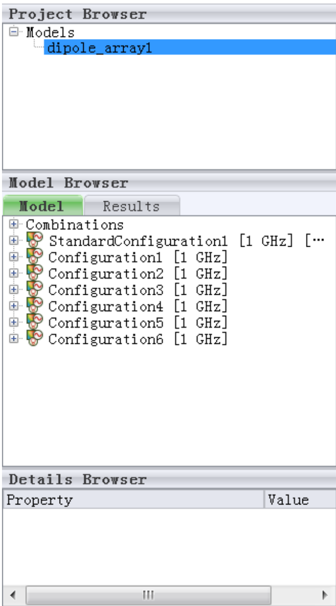


图 5-266　6 种不同的相位组合

（12）显示 3D 结果

在 POSTFEKO 中，启动之后默认显示是 3D 视图方式，单击“Far Field”按钮选择“ff3D”显示 3D 辐射方向图，在右侧面板中，勾选“dB”复选框。

进入“Result”菜单，单击“Grid”按钮，在 3D 结果中不显示网格，如图 5-267 所示。

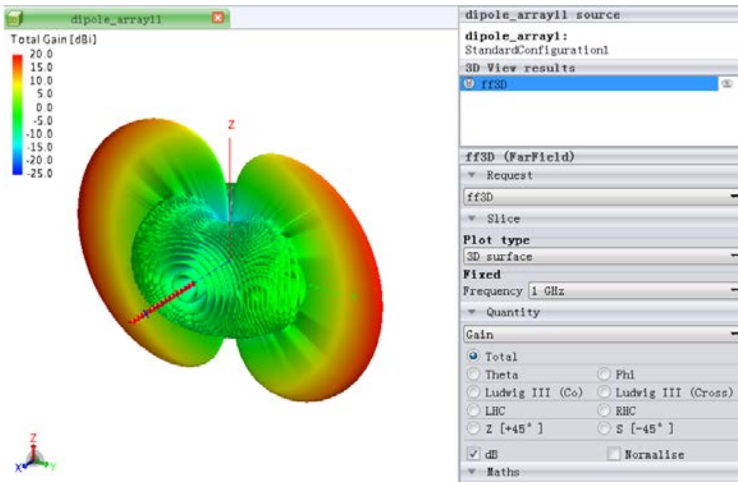


图 5-267　显示 3D 计算结果（主瓣指向 y 轴时）

在右侧控制面板最上方的“dipole_array1_source”区域，查看主瓣指向偏离 y 方向的方向图，如图 5-268 所示，选择“Configuration5”。

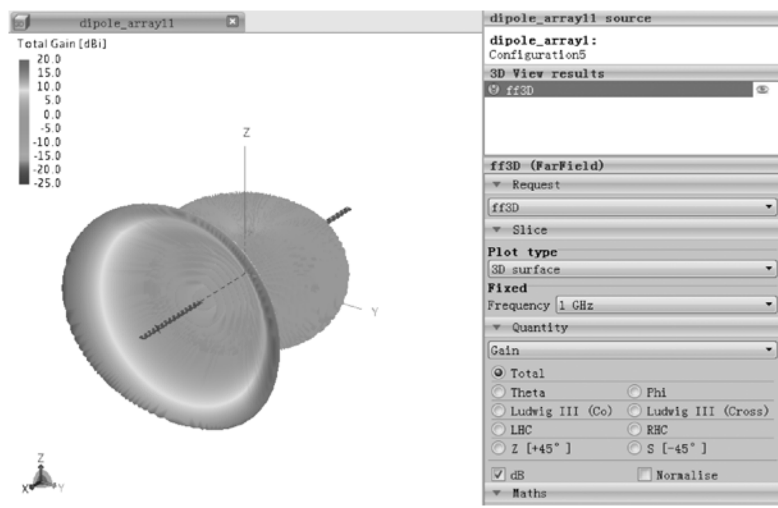


图 5-268　主瓣偏离 y 轴一定角度（60°）时的 3D 方向图

（13）显示 2D 结果

单击“Home”菜单中的“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graphic1”，在左侧的“Model Browser”区域内，依次选择“StandardConfiguration1”“Configuration1”“Configuration2”“Configuration3”“Configuration4”“Configuration5”“Configuration6”中位于“Request”下的“ff_XOY”，用鼠标拖动到中间的直角坐标系中，在右侧面板中进行如下设置。

在右上方的“Traces”区域内，同时，选中所导入的曲线“ffXOY_?”。勾选“dB”复选框。进入“Measure”菜单，选择“Point”中的“Global maximum”。2D 增益方向图如图 5-269 所示。

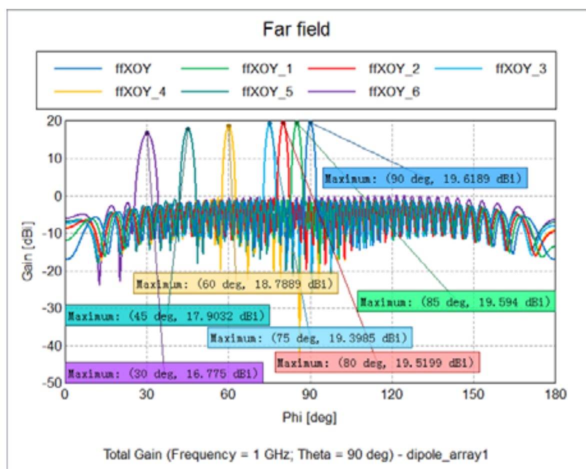


图 5-269　2D 增益方向图

在“Home”菜单中，单击“Save”按钮保存为“dipole_array.pfs”，退出 POSTFEKO。

5.10 汽车车窗天线（Windscreen）

通信终端是现代车载所必需设备，不断增加的功能要求车载制造商引入越来越多的天线，如 AM/FM 天线、GPS 天线、电视天线等。车载天线的安装位置需要从天线功能性和美观性两个角度考虑。目前，将一些天线集成在汽车车窗上是一种常见的设计安装方法，因此，工程师们需要模拟不同类型的车窗天线，并评估其性能指标。

5.10.1 车窗天线仿真技术

目前，汽车 AM/FM 天线通常集成在汽车的后窗玻璃上，利用金属涂料将接收线印制在玻璃上，连接车内的低噪声放大器，电磁波信号输入接收机。车窗 AM/FM 天线的设计仿真需要考虑薄且多层材料的玻璃结构、嵌入到玻璃中的金属丝以及汽车车身的相互电磁耦合作用。针对此类问题，FEKO 提供了一种精确、高效的计算方法，该方法精确考虑天线及周围的玻璃、车身等环境，具体包括以下内容：

1）任意弯曲的车窗玻璃结构。

2）玻璃内的多层介质材料。

3）天线与玻璃介质材料之间的耦合。

4）汽车多块玻璃结构。

5）车体影响。

6）真实地面对天线性能的影响。

FEKO 对车窗天线的仿真方法基于矩量法（MoM），只对汽车车体以及天线金属丝进行网格剖分。对玻璃结构尽管也剖分成平面或曲面三角形，但这些网格不参与计算部分，而只是作为天线金属丝的参考单元，将其电磁特性考虑到天线金属丝的计算中。该方法支持车窗天线的各种特性，如天线及车身的电流分布、输入阻抗及 S 参数，以及近场、远场辐射方向图等。

5.10.2 车窗天线布局的仿真实现

本节案例计算车窗天线的输入阻抗，天线位于车窗玻璃内部，并考虑部分车身对天线输入阻抗的影响。图 5-270 所示为车窗天线计算模型。

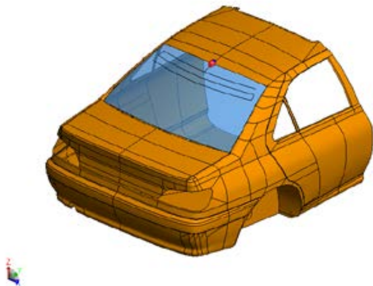


图 5–270　车窗天线计算模型

启动 CADFEKO，新建一个工程“Windscreen_Antenna.cfx”。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，如图 5-271 所示。在“Model unit”对话框中，选中“Metres(m)”单选按钮，如图 5-272 所示。

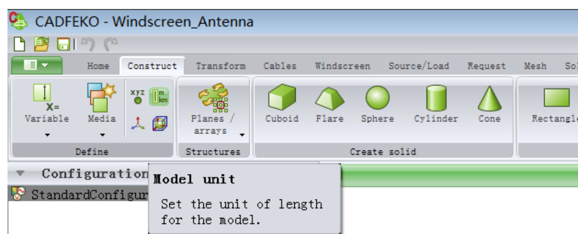


图 5-271 选择单位设置

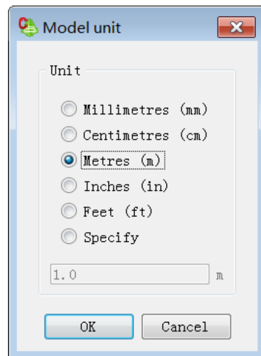


图 5-272 单位设置

（2）创建模型

这个案例中的模型创建通过导入现有几何模型（…/chapter05/app5/5.10/include/car_geometry.x_b）来完成。单击“Home”菜单中的“Import”按钮，选择“Geometry”。选择模型文件“car_geometry.x_b”并设置“scale=1”，如图 5-273 所示。

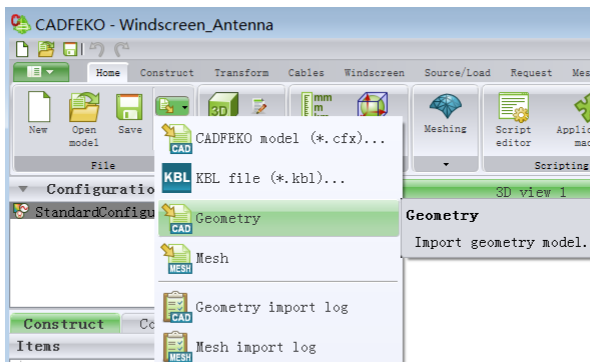


图 5-273 选择 Import 导入几何模型

在左侧的树形浏览器中将导入的模型重新命名，将车身模型命名为“car_body”，将天线模型命名为“antenna”，将玻璃模型命名为“windscreen”。同时选中“car_body”和“antenna”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，对两个模型进行合并操作。确保天线与汽车结构的网格连续。而“windscreen”由于计算中只作为“antenna”的参考面，因此不需要一起选择进行“Union”操作。

（3）创建天线端口

选择天线中与汽车车身相连接的 wire，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，如图 5-274 所示。在打开的“Create wire port(geometry)”对话框中设置“Place port on”为“Vertex”、“Location on wire”为“Start”，创建 Port1，如图 5-275 所示。

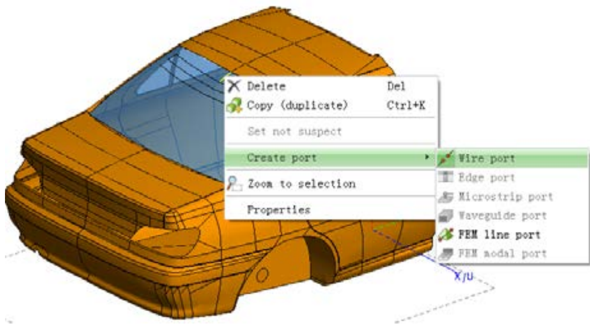


图 5-274 选择天线中与汽车车身相连接的 wire

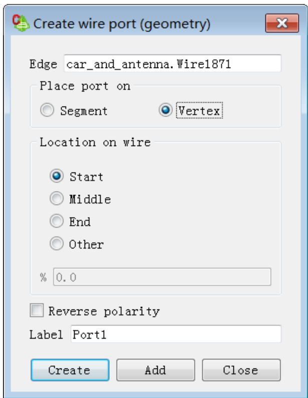


图 5-275 创建天线端口

（4）定义材料

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中，定义相对介电常数“Relative permittivity”和介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”，名称定义为“glass”和“pvb_foil”，如图 5-276 和图 5-277 所示（glass：相对介电常数为 7，介电损耗正切为 0.03；pvb_foil：相对介电常数为 3，介电损耗正切为 0.05）。

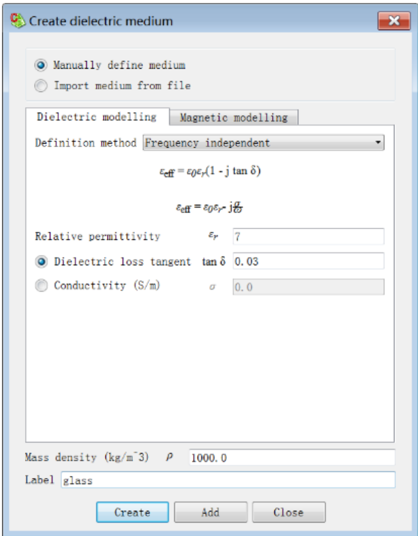


图 5-276 定义介质材料“glass”

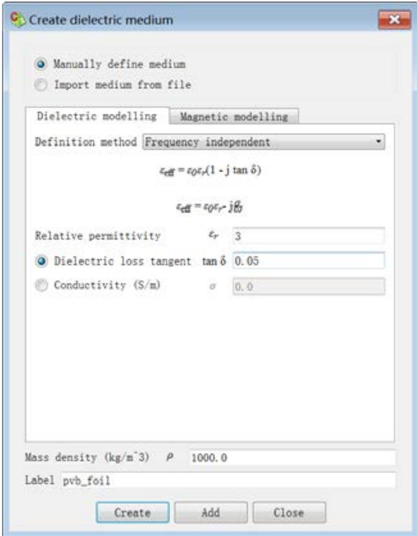


图 5-277 定义介质材料“pvb_foil”

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Layered structures”→“Layered dielectric”选项，在弹出的“Layerd dielectric properties”对话框中，定义分层材料，如图 5-278 所示，设置如下。

Layer 1：厚度 2.1mm，材料 glass。

Layer 2：厚度 0.76mm，材料 pvb_foil。

Layer 3：厚度 2.1mm，材料 glass。

Label：Windscreen_layers，单击“Create”按钮。

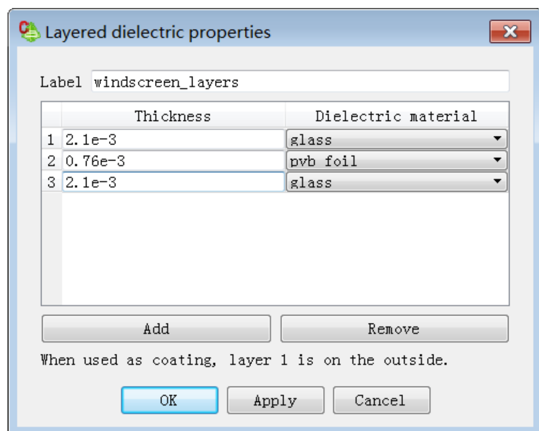


图 5-278 定义分层材料“windscreen_layers”

选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Windscreen layers”结点，在弹出的“Define windscreen”对话框中，定义 windscreen，设置“Layer definition”为“windscreen_layers”、“Offset L”为 2.1e−3+0.76e−3，设置“Label”为“Windscreen_definition”，单击“Create”按钮，如图 5-279 所示。

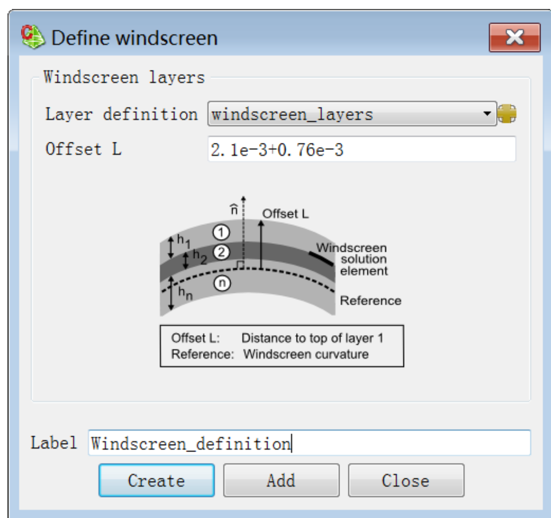


图 5-279 定义分层材料“windscreen”

（5）设置车窗面属性

选择车窗面，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，如图 5-280 所示，弹出“Face properties”对话框，在“Meshing”选项卡中设置“Local mesh size”为 0.6。FEKO 中针对车窗天线的特殊算法，只要求玻璃结构的网格能够精确模拟几何结构即可，无须满足其仿真电尺寸要求，FEKO 软件自动应用曲面单元模拟玻璃结构。在“Solution”选项卡中进行如下设置。

Solve with special solution method：Windscreen。

Windscreen name： windscreen_definition。

Element type：Reference element，如图 5-281 所示，单击“OK”按钮。

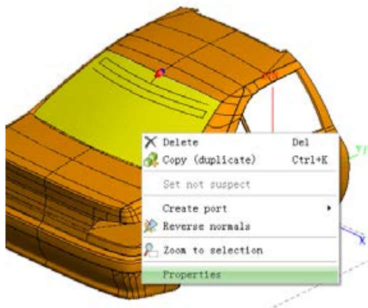


图 5-280 选择车窗面

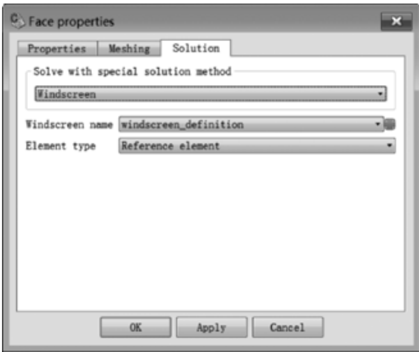


图 5-281 设置车窗面的求解属性

（6）设置天线的求解属性

选择天线结构“car_and_antenna”的所有 Wires，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，如图 5-282 所示，在弹出的“Edge properties”对话框中，在“Solution”选项卡中进行如下设置。其中，“Offset A”为 0，说明天线单元位于“Reference plane”位置。

Solve with special solution method：Windscreen。

Windscreen name：windscreen_definition。

Offset A：0，如图 5-283 所示，单击“OK”按钮。

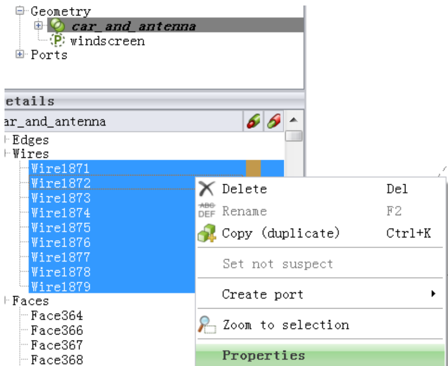


图 5-282 设置车窗面的求解属性 1

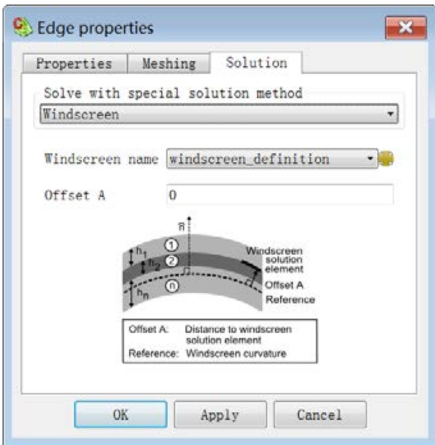


图 5-283 设置车窗面的求解属性 2

（7）电参数与求解设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Continuous (interpolated) range。

Start frequency (Hz)：90e6。

End frequency (Hz)：110e6。

单击“OK”按钮。

（8）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Voltage Source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 5-284 所示。

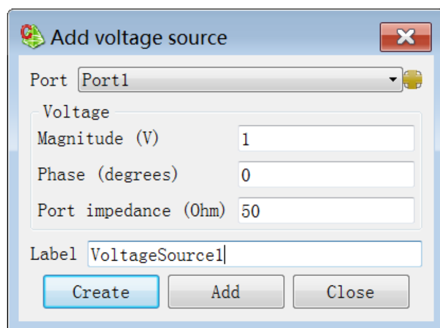


图 5-284　设置电压源激励

（9）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Standard。

Wire segment radius：150e-6。

单击“Mesh”生成网格，如图 5-285 所示。

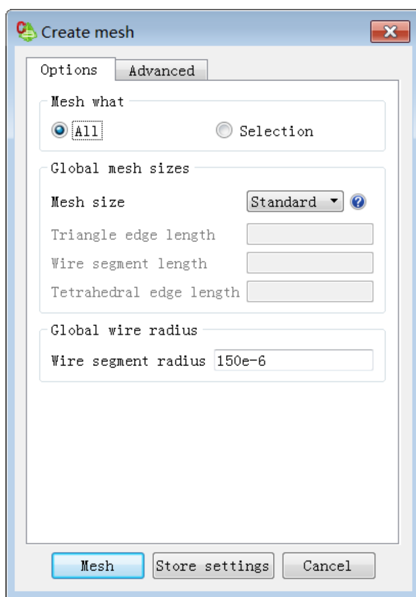


图 5-285　定义网格划分

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算，因为天线的输入阻抗是自动计算的，所以该案例中无须设置求解的“Request”。

（10）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块

POSTFEKO 显示结果。POSTFEKO 启动后默认的显示是 3D 视图方式。

（11）显示阻抗结果

单击“Home”菜单中的“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Source data”→“VoltageSource”，添加端口计算结果，再选择一次添加两条曲线（Traces）。在右侧的树形窗口中对每个 Traces 均设置“Quantity”为“Impedance”，两条曲线分别显示阻抗的实部“Real”和虚部“Imaginary”，如图 5-286 所示。

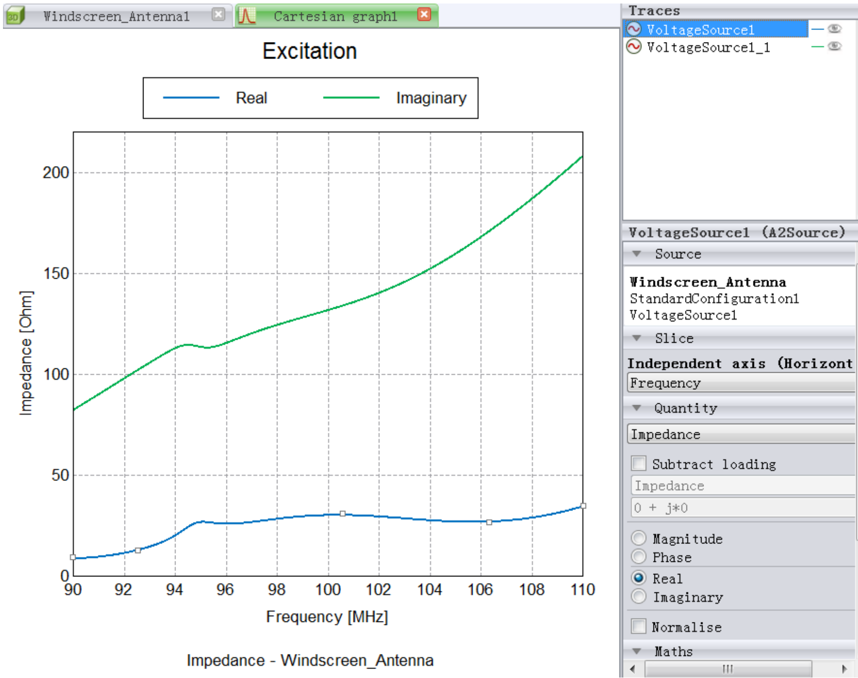


图 5-286　车窗天线的输入阻抗的实部与虚部

第 6 章



工程仿真案例 2——天线罩设计与仿真

6.1　天线罩快速设计
6.2　天线罩透波分析
6.3　天线罩瞄准误差（BSE）仿真

6.1 天线罩快速设计

天线罩又称为雷达天线罩，是保护天线免受自然环境影响的壳体结构。天线罩主要有介质壳体天线罩、介质骨架天线罩、金属骨架天线罩、充气天线罩四大类。介质骨架天线罩和金属骨架天线罩主要用于地面和舰载。相对于充气天线罩，介质壳体天线罩是刚性罩，飞机机头、导弹头天线罩、预警机雷达天线罩、微波透波墙等均为刚性罩，充气天线罩常与机动性雷达配套使用。

根据罩壁结构，分为单层（半波长实心壁、薄壁）天线罩、A 夹层天线罩、B 夹层天线罩、C 夹层天线罩、多夹层结构天线罩。

对于天线罩的快速设计，在 FEKO 中可以选择平面格林函数法（SGF）和周期边界法（PBC）。

对于带频选（FSS）结构的天线罩在雷达频段内透过，在雷达频段外反射，加 FSS 天线罩后，雷达频段外天线的镜像反射被避免了，而雷达天线罩的外表面仅产生漫反射，降低了来波方向上的散射，提高了隐身性能。对于 FSS 天线罩，建议采用 MoM+周期边界的方法。

FSS 单元常用的形式很多，如图 6-1 所示。

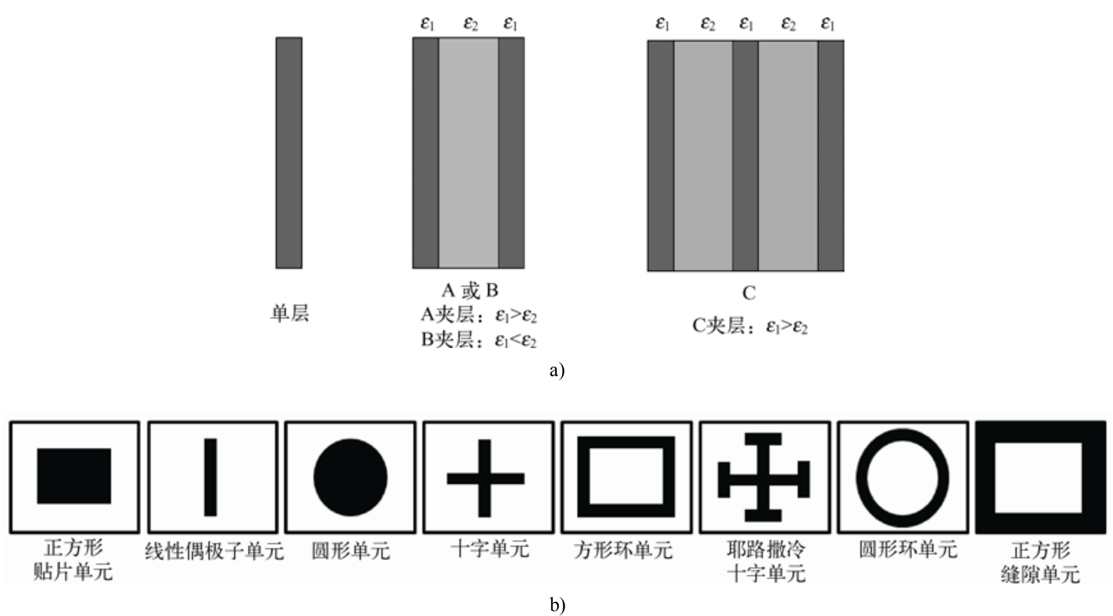


图 6-1 常用的夹层结构和 FSS 单元

a) 常用夹层结构 b) 常用 FSS 单元形式

6.1.1 格林函数法（SGF）

1. 介质平板描述

分层平板结构与材料属性见表 6-1。

表 6-1　分层平板结构与材料属性

分　　层	厚度/mm	相对介电常数	介质损耗正切
第 1 层（顶层）	1	3.4	0.005
第 2 层（里层）	5	1.1	0.0025
第 3 层（底层）	1	3.4	0.005

2. 计算项目

计算垂直入射与斜入射时，该 3 层介质平板结构（见图 6-2）的透波率和反射率如下。

频率范围：2～12GHz，采用自适应扫频技术（AFS）。

采用的技术：MoM 格林函数法（SGF）。

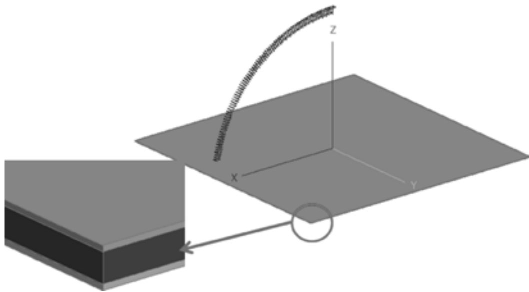


图 6-2　3 层介质平板结构

3. 3 层介质平板的反射率/透波率——仿真过程

启动 CADFEKO，新建一个工程“3layers_plate_R_T.cfx”，在以下的各个操作过程中，可以实时保存做过的任何修改。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Millimetres(mm)”单选按钮，如图 6-3 所示。默认单位为 m（米）。

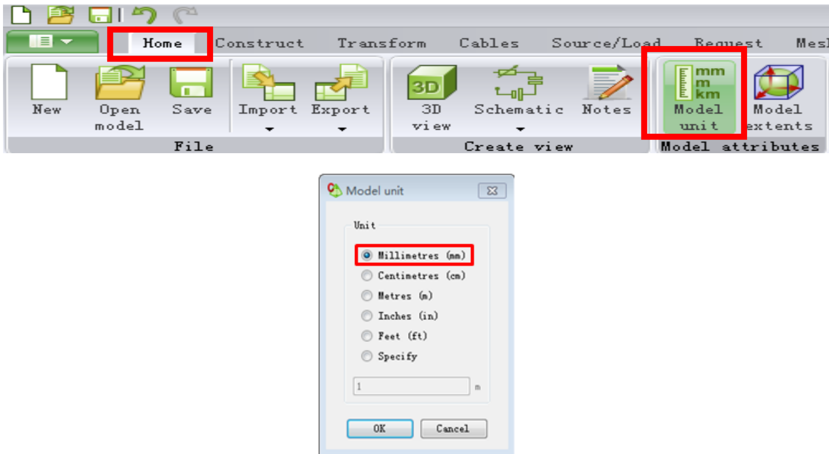


图 6-3　定义长度单位为 mm

（2）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

最小工作频率：fmin=2e9。

最大工作频率：fmax=12e9。

相对介电常数：epsr1=3.4。

相对介电常数：epsr2=1.1。

介质损耗正切：tand1=0.005。

介质损耗正切：tand2=0.0025。

介质层厚度（第 1、3 层）：h1=1、h2=1。

介质层厚度（中间层）：h3=5，如图 6-4 所示。

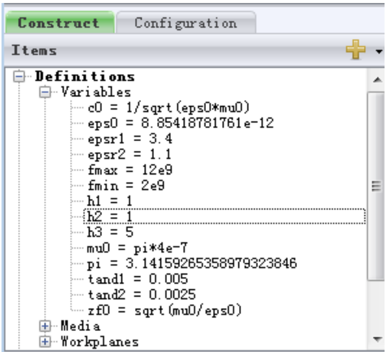


图 6-4　定义变量

（3）定义材料

在 CADFEKO 左侧的树形浏览器选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中进行如下设置。

定义相对介电常数“Relative permittivity”：epsr1。

介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”：tand1。

Label：mat1。

单击“Add”按钮，继续设置。

定义相对介电常数“Relative permittivity”：epsr2。

介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”：tand2。

Label：mat2。

单击“Create”按钮，如图 6-5 所示。

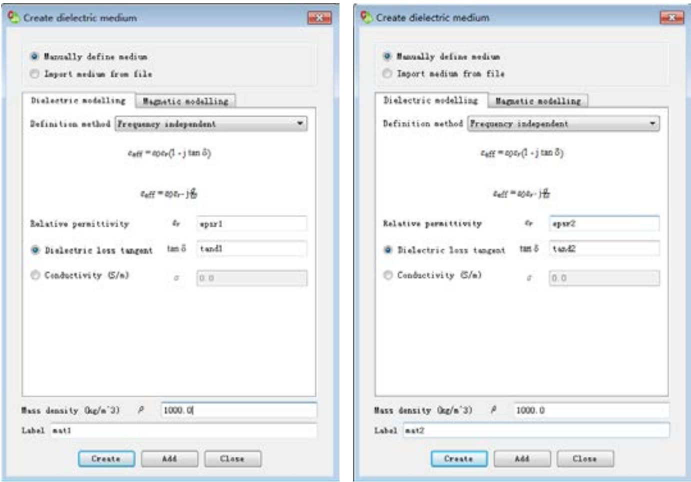


图 6-5　定义介质材料

（4）定义无限大介质平板

在菜单栏中单击“Construct”→“Planes/arrays”→“Plane/Ground”，弹出“Plane/ground”对话框，选中“Planar multilayer substrate”单选按钮，单击“Add”按钮两次，设置如下。

Layer 1 层：“Ground plane”修改为“None”，“Thickness”修改为 h1，“Medium”为“mat1”。

Layer 2 层：“Ground plane”修改为“None”，“Thickness”修改为 h3，“Medium”为“mat2”。

Layer 3 层：“Ground plane”修改为“None”，“Thickness”修改为 h2，“Medium”为“mat1”。

单击“OK”按钮，如图 6-6 所示。

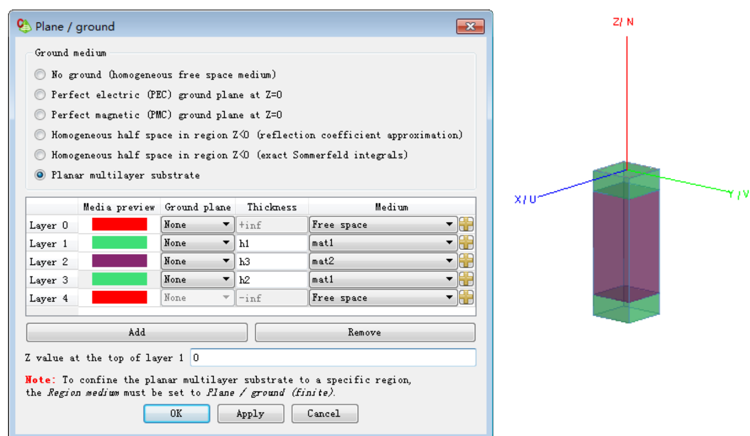


图 6-6　无限大介质平面设置

（5）电参数与求解设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Continuous (interpolated) range。

Start frequency (Hz)：fmin。

End frequency (Hz)：fmax。

单击“OK”按钮，如图 6-7 所示。

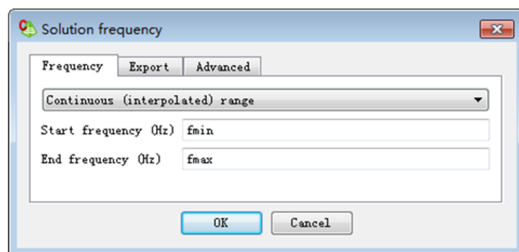


图 6-7　设置自适应插值扫频计算

（6）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Plane wave”选项，弹出“Add plane wave source”对话框，如图 6-8 所示，进行如下设置。

选中：Loop over multiple directions。

Start：(θ =0.0, φ =0.0)。

End：(θ =80, φ =0.0)。

Increment：(θ =1, φ =0)。

Polarisation angle(degrees)：90。

Label：PlaneWaveSource_VV。

单击“Create”按钮。

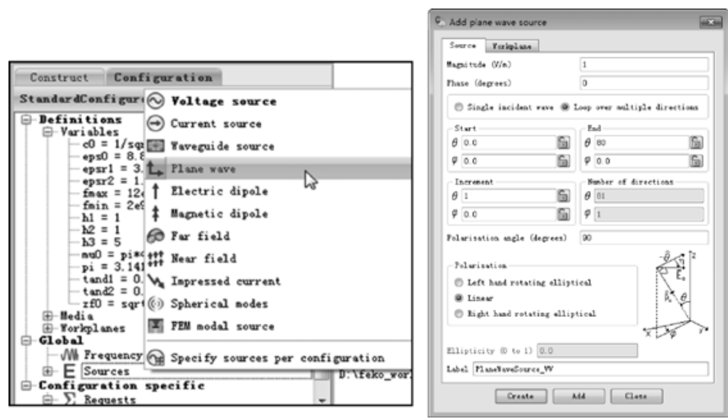


图 6-8　设置平面波激励

（7）求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”结点，单击鼠标右键并选择“Transmission/reflection”选项，弹出“Request transmission/reflection coefficient”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 6-9 所示。

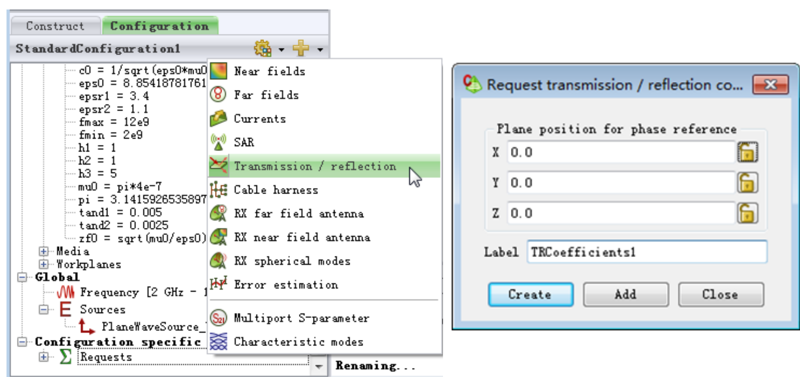


图 6-9　设置反射率/透波率计算

（8）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（9）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块

POSTFEKO 显示结果。

（10）显示 2D 结果

单击“Home”菜单中的“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Transmission/Reflection”按钮，选择“TRCoefficients1”，如图 6-10 所示。默认情况下，会显示反射率。



图 6-10　直角坐标系中显示 T/R

在右侧的控制面板中，可以看到以下内容。

Independent axis(Horizontal)：Frequency。

Quantity：Reflection coefficient。

显示的是 Total 和 Magnitude，如图 6-11 所示。

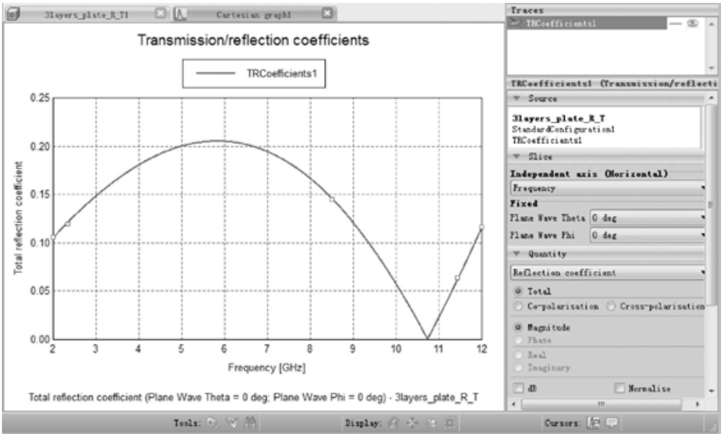


图 6-11　显示正入射反射率

把“Quantity”修正为“Transmission coefficient”，显示为透波系数，如图 6-12 所示。

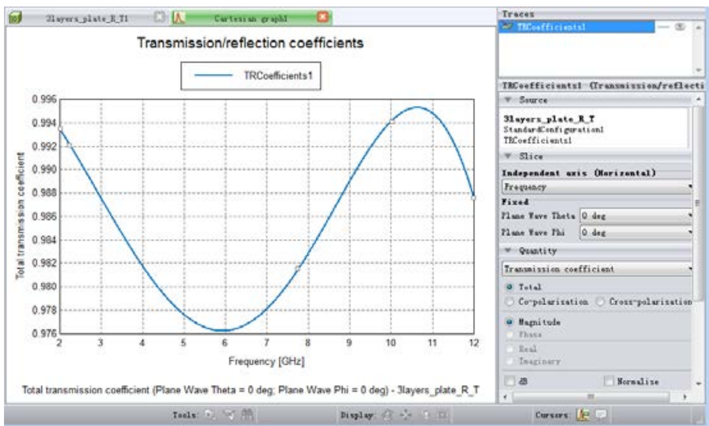


图 6-12　显示正入射透波率

把“Independent axis(Horizontal)”修正为“Plane Wave Theta”。选择工作频率为“Simulation frequencies”，如 2GHz，即可显示当前频率下的透波系数，如图 6-13 所示。

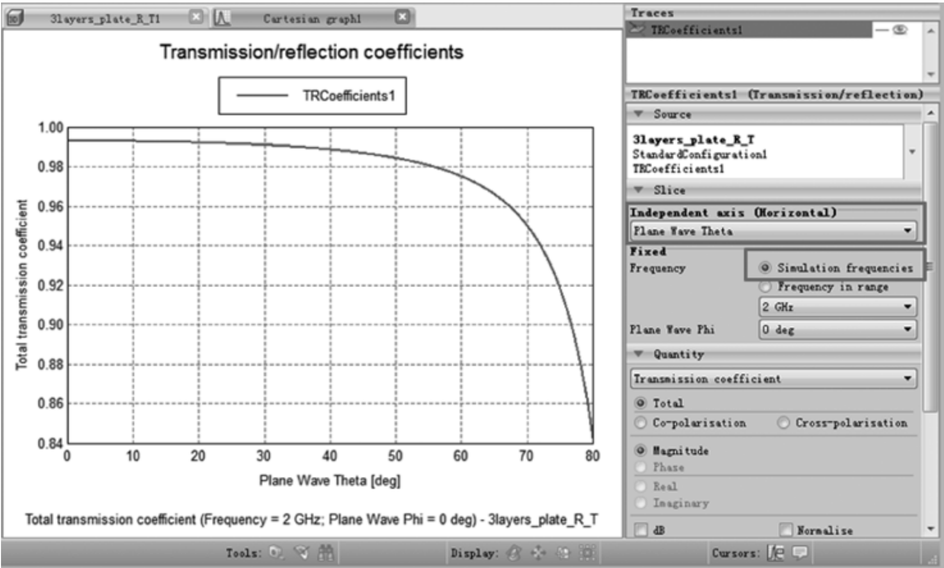


图 6-13　显示 2GHz 下的透波率对比角度（Theta）

在右侧的控制面板中，选中“Traces”中的“TRCoefficients1”，按〈Ctrl+K〉快捷键，复制该曲线。把频率修改为 12GHz，2GHz 与 12GHz 的透波系数在同一直角坐标系中显示，如图 6-14 所示。

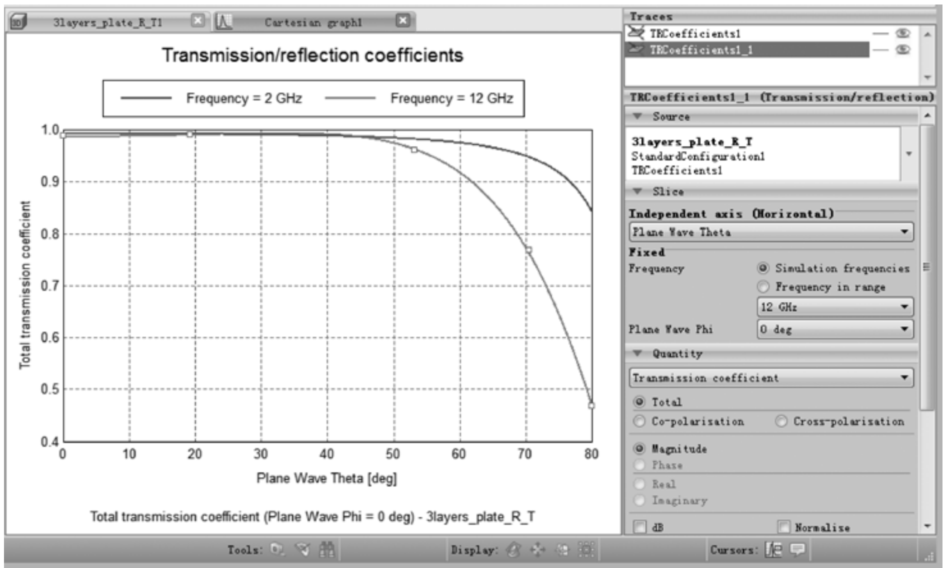


图 6-14　显示 2GHz 和 12GHz 下的透波率对比角度（Theta）

（11）保存与退出

保存该文件并退出 POSTFEKO。

6.1.2 周期边界法（PBC）

1. 频率选择表面描述

分层结构与材料属性见表 6-2。

表 6-2 分层结构与材料属性

分　　层	厚度/mm	相对介电常数	介质损耗正切
第 1 层（最上层）	0.5	3.4	0.005
第 2 层（FSS）	0.018		
第 3 层	0.5	3.4	0.005
第 4 层（里层）	5	1.1	0.0025
第 5 层	0.5	3.4	0.005
第 6 层（FSS 层）	0.018		
第 6 层（最内侧）	0.5	3.4	0.005

2. 频率选择表面单元

形式：圆环，内径 *Rin*=0.6mm，外径 *Rout*=1.2mm。
阵列形式：采用矩形阵，x 轴方向间距 *a*=3.5mm，y 轴方向间距 *b*=3mm。
所采用的 FSS 单元形式与尺寸如图 6-15 所示。

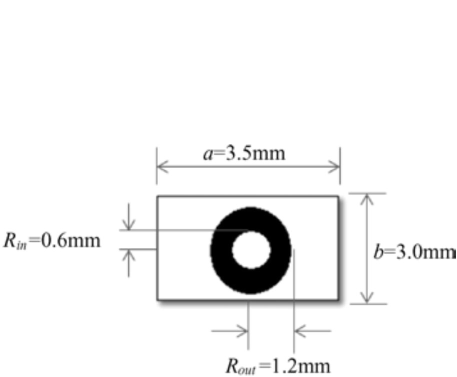


图 6-15 所采用的 FSS 单元形式与尺寸

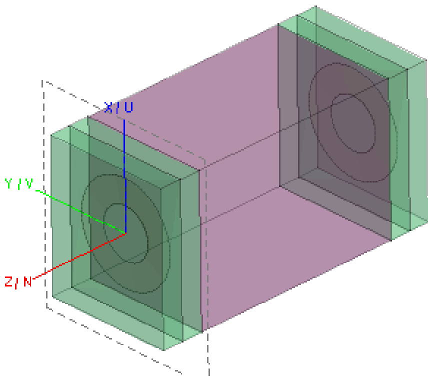


图 6-16 两层 FSS+五层介质平板结构

3. 计算项目

计算垂直入射时，该频选结构的透波率和反射率如下。
频率范围：2～12GHz，采用自适应插值扫频技术（AFS）。
采用的技术：MoM+PBC。

4. 两层FSS与 5 层介质平板的反射率/透波率——仿真过程

启动 CADFEKO，新建一个工程“FSS_ring_with_5_layers.cfx”，在以下的各个操作过程

中，可以实时保存做过的任何修改。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Millimetres(mm)”单选按钮，如图 6-17 所示。默认单位为 m（米）。



图 6-17　定义长度单位

（2）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

最小工作频率：fmin=2e9。

最大工作频率：fmax=12e9。

FSS 单元内环半径：Rin=0.6。

FSS 单元外环半径：Rout=1.2。

x 轴方向单元间距为：a=3.5。

y 轴方向单元间距为：b=3。

频选厚度：t=0.018。

第 1、2、4、5 层介质材料：

相对介电常数：epsr1=3.4。

介质损耗正切：tand1=0.005。

厚度：h1=0.5，h2=0.5。

第 3 层介质材料：

相对介电常数：epsr2 = 1.1。

介质损耗正切：tand2 = 0.0025。

厚度：h3=5。

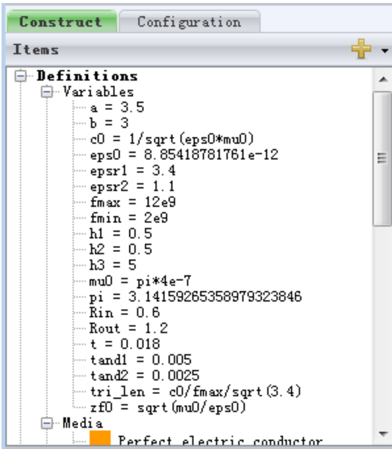


图 6-18　定义变量

（3）定义材料

在 CADFEKO 左侧的树形浏览器选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中进行如下设置。

定义相对介电常数“Relative permittivity”：epsr1。

介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”：tand1。

Label：mat1。

单击“Add”按钮，继续设置。

定义相对介电常数“Relative permittivity”：epsr2。

介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”：tand2。

Label：mat2。

单击“Create”按钮，如图 6-19 所示。

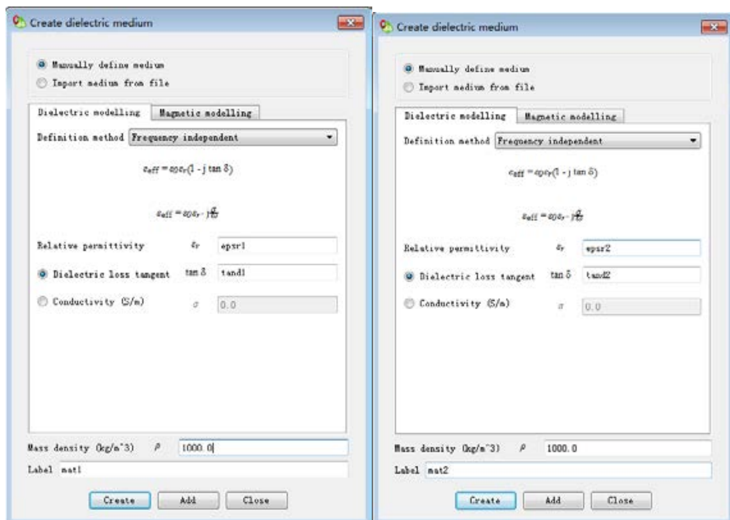


图 6-19　定义介质材料

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中，选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Media Library”选项，在弹出的“Media library”对话框中选中第 28 种材料“Copper”，单击“Add to model”按钮，如图 6-20 所示。

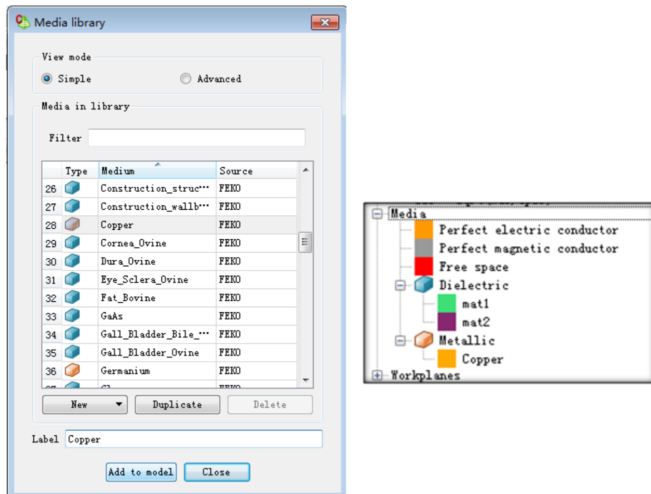


图 6-20　从材料库中选择材料“Copper”添加到工程中

（4）建立 FSS 单元模型

单击“Construct”菜单中的“Ellipse”按钮，弹出“Create ellipse”对话框，进行如下设置。

Centre point：(U：0.0, V：0.0, N：0.0)。

Radius (U)：rin。

Radius (V)：rin。

Label：rin。

单击“Add”按钮，继续设置。

Radius (U)：rout。

Radius (V)：rout。

Label：rout。

单击“Create”按钮，如图 6-21 所示。

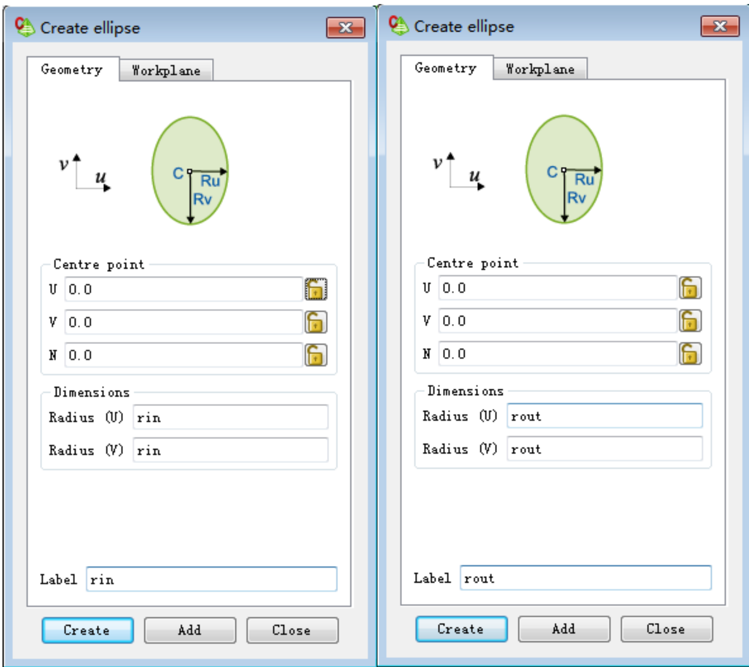


图 6-21　创建 rout 和 rin

在左侧的树形浏览器中，在“Model”→“Geometry”结点下，选中模型“rin”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Subtract from”选项，弹出“Subtract from”对话框，单击树形浏览器中的“Geometry”结点下的模型“rout”，把新生成的模型命名为“cell”。

（5）为模型“cell”赋面材料属性

在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中模型“cell”，在左下角的“Details”中，展开“Faces”结点，选中所有的面元，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

Medium：Copper。

Thickness：t。

单击“OK”按钮，如图 6-22 所示。

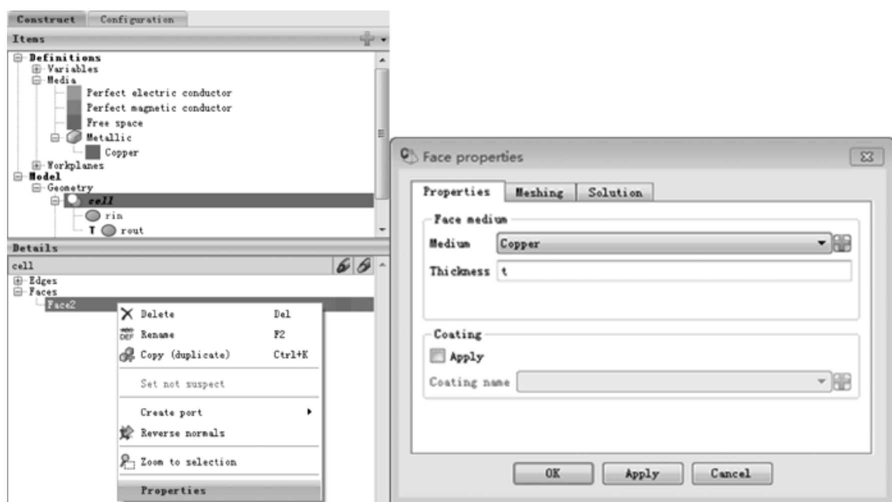


图 6-22　为模型“Cell”面元赋面材料属性

（6）复制、平移模型“Cell”

在左侧的树形浏览器中，在“Geometry”结点中选中模型“cell”，单击鼠标右键，选择“Copy special”→“and translate”选项，弹出“Copy and translate”对话框，进行如下设置。

From：(U：0.0, V：0.0, N：0.0)。

To：(U：0.0, V：0.0, N：−h2−h3−h2)。

Number of copies：1。

单击“OK”按钮，如图 6-23 所示。

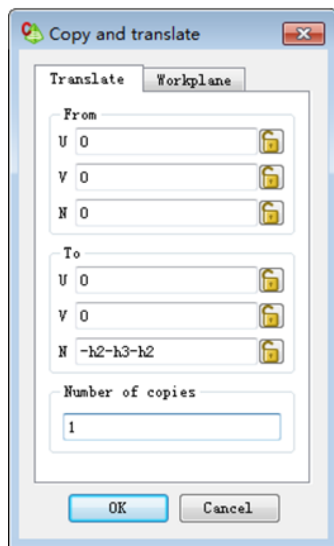


图 6-23　模型“cell”的复制、平移

（7）创建介质层

单击“Construct”菜单中的“Cuboid”按钮，弹出“Create cuboid”对话框，进行如下设置。

Define method：Base centre,width,depth,height。

Base centre (C)：(U：0.0, V：0.0, N：0.0)。

Width (U)：a。

Depth (D)：b。

Height (H)：h1。

Label：sub1。

单击“Add”按钮，继续设置。

Base centre (C)：(U：0.0, V：0.0, N：−h2)。

Width (U)：a。

Depth (D)：b。

Height (H)：h2。

Label：sub2。

单击“Add”按钮，如图 6-24 所示。

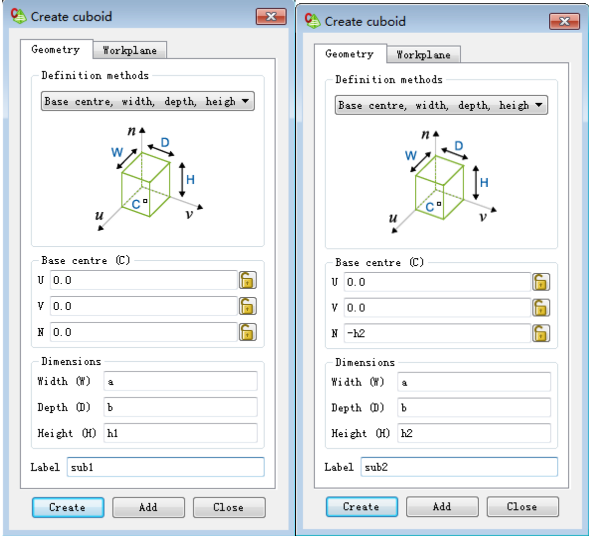


图 6-24 创建 sub1 和 sub2

Base centre (C)：(U：0.0, V：0.0, N：−h2−h3)。

Width (U)：a。

Depth (D)：b。

Height (H)：h3。

Label：sub3。

单击“Add”按钮，继续设置。

Base centre (C)：(U：0.0, V：0.0, N：−h2−h3−h2)。

Width (U)：a。

Depth (D)：b。

Height (H)：h2。

Label：sub4。

单击“Add”按钮，如图 6-25 所示。

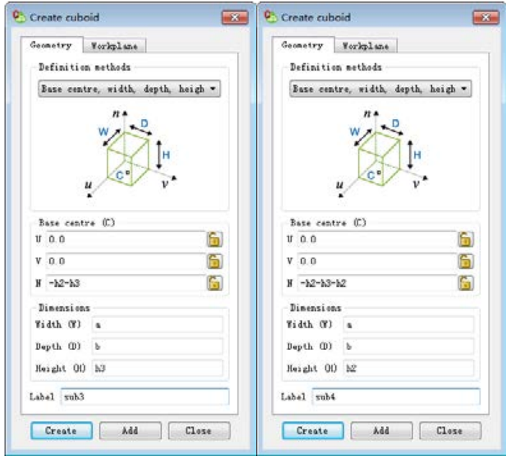


图 6-25 创建 sub3 和 sub4

Base centre (C)：(U：0.0, V：0.0, N：−h2−h3−h2−h1)。

Width (U)：a。

Depth (D)：b。

Height (H)：h1。

Label：sub5。

单击“Create”按钮，如图 6−26 所示。

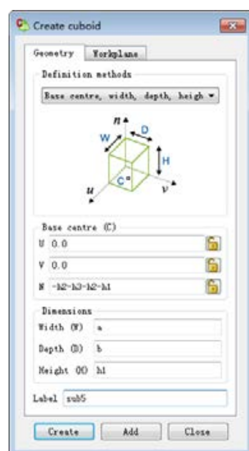


图 6−26　创建 sub5

（8）材料设置

1）在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中模型“sub1”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选择所有的体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，如图 6−27 所示，进行如下设置。

Medium 修正为：mat1。

单击“OK”按钮。

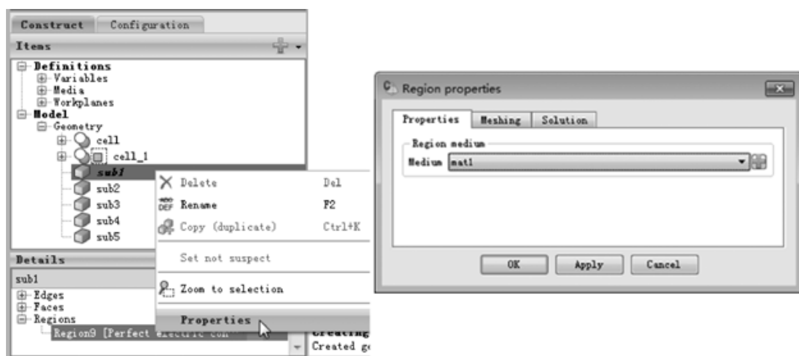


图 6−27　设置 sub1 体的材料属性为“mat1”

2）在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中模型“sub2”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选择所有的体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium 修正为：mat1。

单击“OK”按钮。

3）在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中模型“sub3”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选择所有的体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium 修正为：mat2。

单击“OK”按钮。

4）在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中模型“sub4”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”，选择所有的体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium 修正为：mat1。

单击“OK”按钮。

5）在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中模型“sub5”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选择所有的体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium 修正为：mat1。

单击“OK”按钮。

在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选择所有的模型（cell，cell_1，sub1，sub2，sub3，sub4 和 sub5），单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“FSS”。

（9）设定周期边界条件

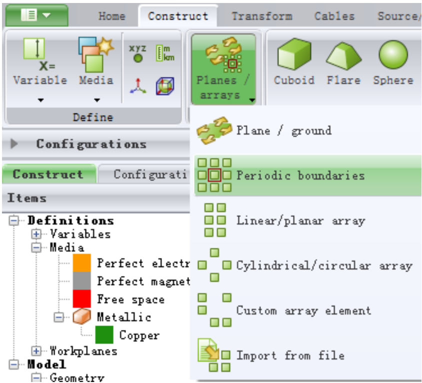
单击菜单栏中的“Construct”→“Planes/arrays”→“Periodic boundaries”按钮，弹出“Periodic boundary condition”对话框，如图 6-28 所示，进行如下设置。

Number of dimensions：Two dimensions。

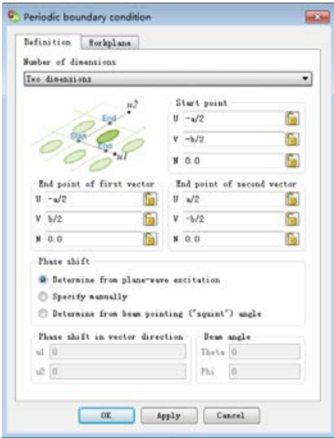
Start point：(U：−a/2, V：−b/2, N：0.0)。

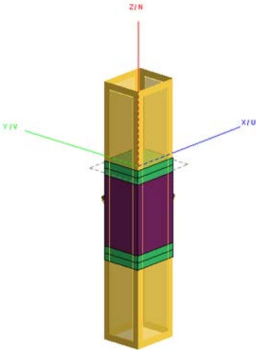
End point of first vector：(U：−a/2, V：b/2, N：0.0)。

End point of second vector：(U：a/2, V：−b/2, N：0.0)。



a)





b)

图 6-28　设定周期边界条件

单击“OK”按钮。

（10）电参数与求解设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Continuous (interpolated) range。

Start frequency (Hz)：fmin。

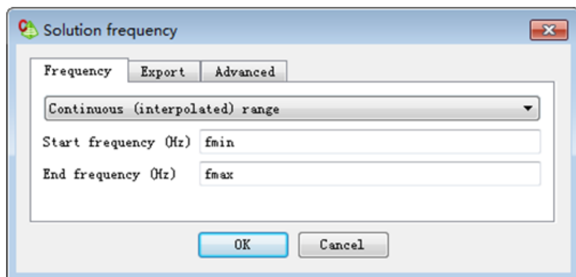
End frequency (Hz)：fmax。

切换到“Advanced”选项卡：

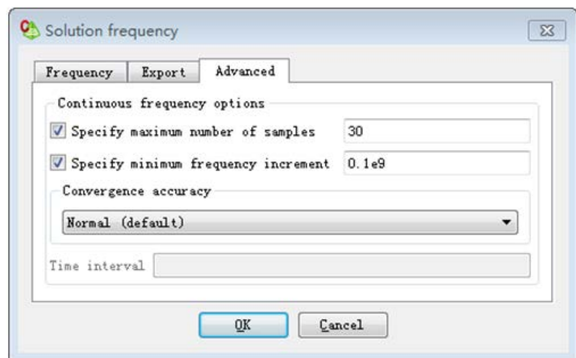
勾选：Specify maximum number of samples，设置值为 30。

勾选：Specify minimum frequency increment：0.1e9。

单击“OK”按钮，如图 6-29 所示。



a)



b)

图 6-29　工作频率设置

a) 设置自适应插值扫频计算　b) 扫频设置（高级）

（11）激励设置

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Plane wave”选项，弹出“Add plane wave source”对话框，进行如下设置。

选中：Single incident wave。

Direction：(θ=0.0, φ=0.0)。

Polarisation angle(degrees)：90.0。

Label：PlaneWaveSource1。

单击“Create”按钮，如图 6-30 所示。

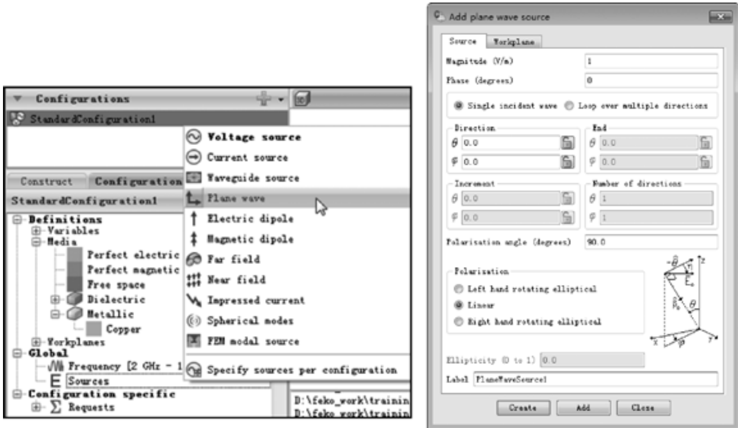


图 6-30　设置平面波激励

（12）求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“Transmission/reflection”选项，弹出“Request transmission/reflection coefficient”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 6-31 所示。

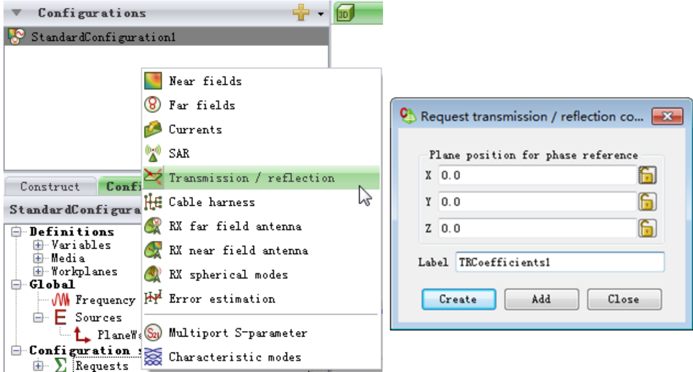


图 6-31　设置反射率/透波率计算

（13）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形网格边长“Triangle edge length”：0.8。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 6-32 所示。

（14）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（15）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块

POSTFEKO 显示结果。



图 6-32　生成网格

（16）显示 2D 结果

单击“Home”菜单中的“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Transmission/Reflection”按钮 ，选择“TRCoefficients1”，如图 6-33 所示。默认情况下，会显示反射率。



图 6-33　直角坐标系中显示 T/R

在右侧控制面板中，可以看到以下内容。

Independent axis(Horizontal)：Frequency。

Quantity：Reflection coefficient。

显示的是 Total 和 Magnitude，如图 6-34 所示。

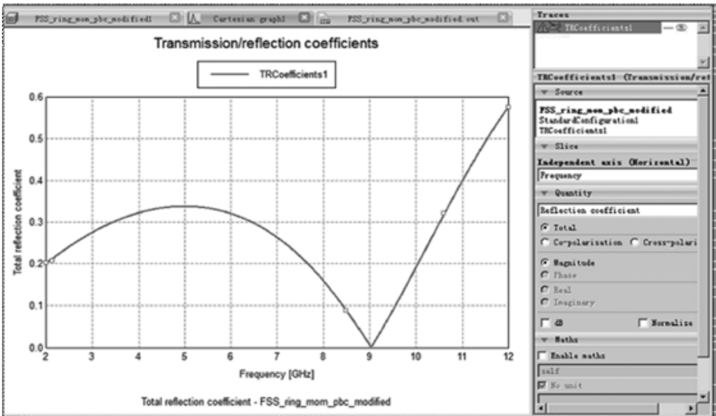


图 6-34　显示正入射反射率

把“Quantity”修正为“Transmission coefficient”，显示为透波系数，如图 6-35 所示。

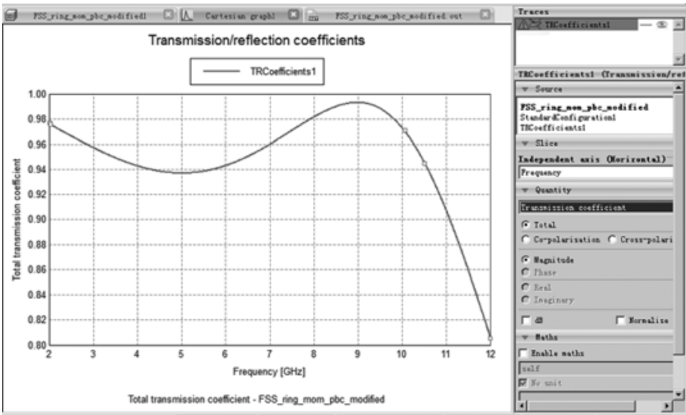


图 6-35 显示正入射透波率

（17）保存与退出

保存该文件并退出 POSTFEKO。

6.2 天线罩透波分析

6.2.1 天线罩仿真流程与求解器选择技巧

当天线罩的电尺寸小于 10 个波长时，可以选择采用 MoM 或 MLFMM。

当天线罩的电尺寸大于 10 个波长、上百个波长时，可以选择 MLFMM 或 MLFMM+FEM。

当天线罩的电尺寸达到上千个波长，天线阵列可以等效为点源时，可以选择 RL-GO 方法。

天线罩仿真流程如图 6-36 所示。

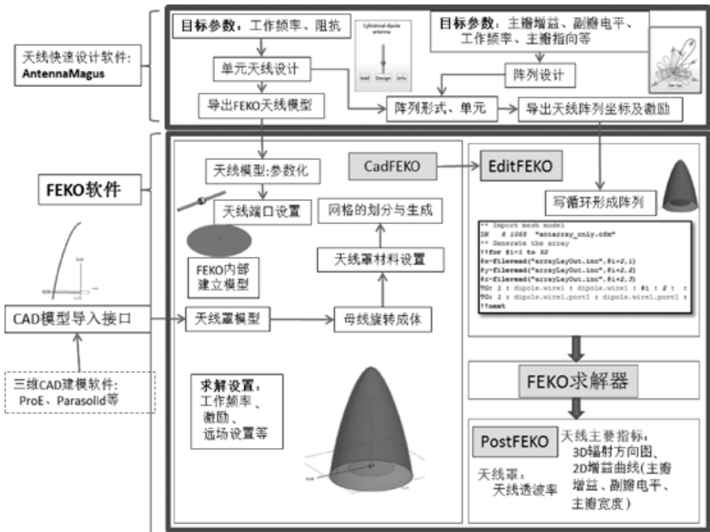


图 6-36 天线罩仿真流程

6.2.2 FEKO软件的仿真实现

工作频率：freq=8GHz。

天线：采用 93 个偶极子辐射单元+反射板。

天线振子长度：0.45×lam，极化方向在 X 方向。

天线阵列单元排布规律参见文件：antarrayLayOut.inc（保存于.../chapter06/app2/Include/）。

反射板离开辐射振子的距离为：0.25×lam。

反射板半径：R=110 mm。

天线罩：

相对介电常数：epsr=2.23。

介质损耗正切：tand=0.015。

天线罩母线文件从 radome.cfx 文件中读入（保存于.../chapter06/app2/Include/）。

天线阵列的端口和激励的复制在 EDITFEKO 中完成。天线阵列与天线罩模型如图 6-37 所示。

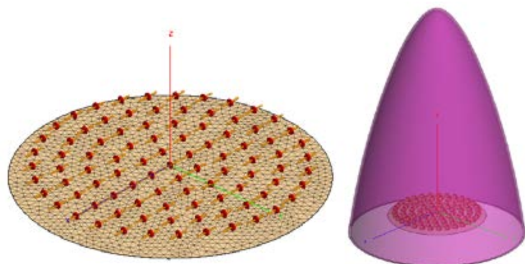


图 6-37　天线阵列与天线罩模型

启动 CADFEKO，新建一个工程“antarray_with_Radome.cfx”，在以下的各个操作过程中，可以及时保存做过的任何修改。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Millimetres(mm)”单选按钮，如图 6-38 所示。默认单位为 m（米）。

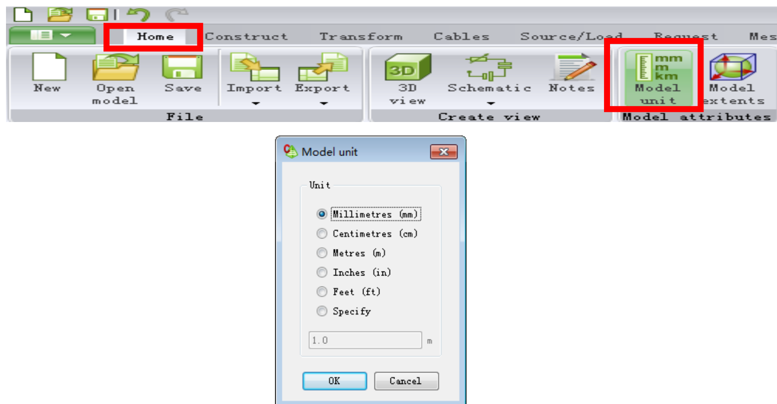


图 6-38　设置长度单位

（2）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=8e9。

工作波长：lam=c0/freq/0.001。

相对介电常数 epsr=2.33。

介质损耗正切：tand=0.015。

天线反射板半径：R=110。

天线反射板离偶极子阵列的距离：offset=−lam/4。

天线罩网格剖分标准：radome_mesh=lam/3.5。

（3）定义材料

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric medium”选项，在弹出的“Create dielectric medium”对话框中，进行如下设置。

相对介电常数“Relative permittivity”：epsr。

介质损耗正切值“Dielectric loss tangent”：tand。

Label：“radome”。

单击“Create”按钮，如图 6-39 所示。

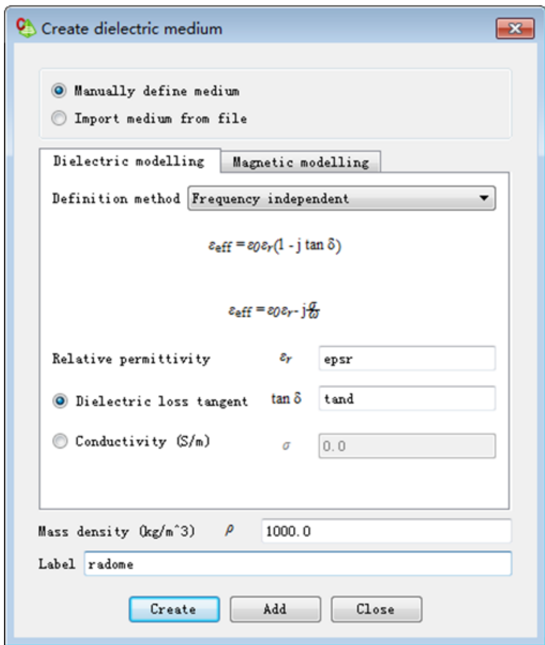


图 6-39　定义天线罩材料

（4）天线模型

在“Construct”菜单中，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，进行如下设置。

Start point：(U：−lam*0.225, V：0.0, N：0.0)。

End point：(U：lam*0.225, V：0.0, N：0.0)。

Label：dipole。

单击“Create”按钮，如图 6-40 所示。

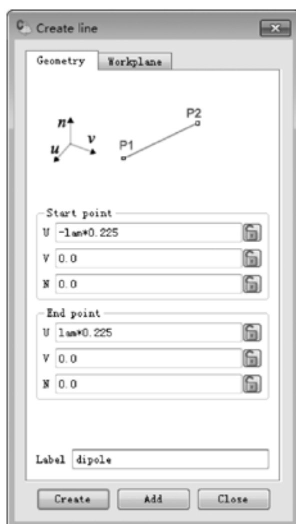


图 6-40　创建偶极子单元天线

（5）天线模型反射板

在“Construct”菜单中，单击“Ellipse”按钮，弹出“Create ellipse”对话框，进行如下设置。

Centre point：(U：0.0, V：0.0 , N：offset)。

Dimensions：

Radius(U)：r。

Radius(V)：r。

Label：ref。

单击“Create”按钮，如图 6-41 所示。

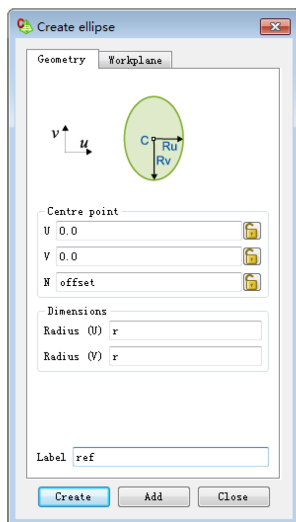


图 6-41　建立偶极子天线反射板

（6）天线罩模型

在“Home”菜单中，单击“Import”→“CADFEKO model（*.cfx）”，选择自带的“radome.cfx”文件，在弹出的“Import CADFEKO model”对话框中，按照图 6-42 所示进行设置，单击“Import”按钮。

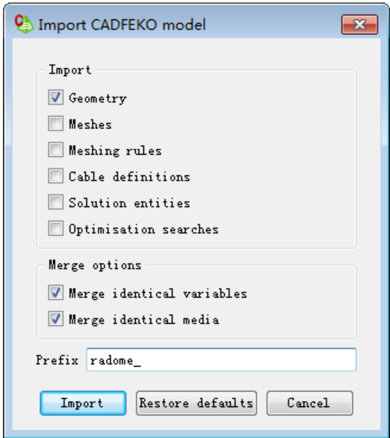


图 6-42　导入外部.cfx 文件

完成导入后，可以发现在左侧的树形浏览器中，在“Model”→“Geometry”结点中有“radome_base”“radome_inner”“radome_outer”，同时选中这 3 个模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，新生成的模型为“Union1”。

选中新模型“Union1”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Spin”选项，在弹出的“Spin geometry”对话框中按照图 6-43 所示进行设置。

旋转中心“Origin”：(U：0.0, V：0.0, N：0.0)。

旋转轴“Axis direction”：(U：0.0, V：0.0, N：1.0)。

旋转角“Angle[degrees]”：360。

单击“Create”按钮，把新生成的模型“Spin1”更名为“radome”。

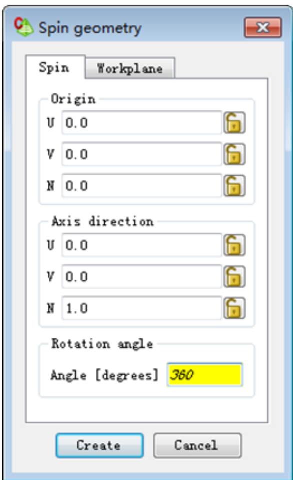


图 6-43　模型旋转成体（Spin）

（7）天线罩母线的删除

对于新旋转而成的模型“radome”，可以看到天线罩的母线是存在的，为保证网格的对称性，可以删除该母线，即在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中 radome，单击鼠标右键，选择“Simplify”选项，在弹出的“Simplify geometry”对话框中，勾选“Remove edges on dielectric surfaces”复选框，如图 6-44 所示。

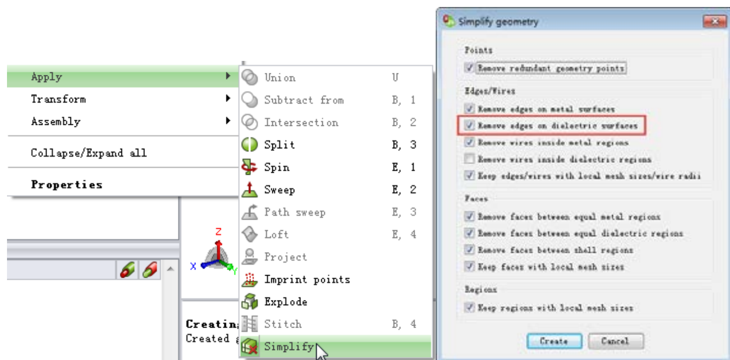


图 6-44　模型简化（删除母线）

（8）天线罩模型材料设置

在左侧的树形浏览器的“Geometry”结点中，选中 radome，在“Details”中，展开“Regions”结点，选择“Region??[free space]”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，在弹出的“Region properties”对话框中，设置“Medium”为“radome”，如图 6-45 所示。

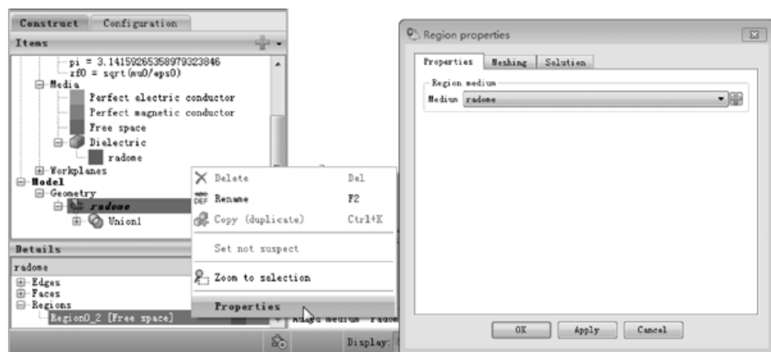


图 6-45　定义 radome 的 Region 材料属性

在“Region properties”对话框中，进入“Meshing”选项卡，进行如下设置。

勾选：Local mesh size。

Mesh size：radome_mesh。

单击“OK”按钮，如图 6-46 所示。

（9）天线端口设置

在左侧的树形浏览器“Model”→“Geometry”结点中选择“dipole”，在其“Details”中展开“Wires”结点，选择“Wire1”（注意，该名称是 Wire1，在 EDITFEKO 中用到它），单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，在弹出的“Create wire port

(geometry)”对话框中，把“Location on wire”设置为“Middle”，在“Label”文本框中输入“Port1”，单击“Create”按钮，如图 6-47 所示。

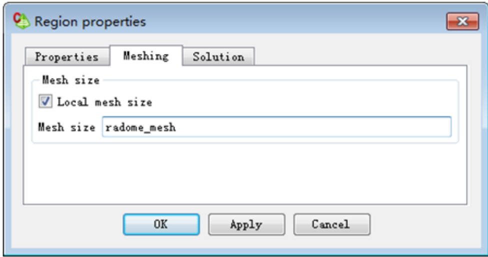


图 6-46　设定网格剖分规则

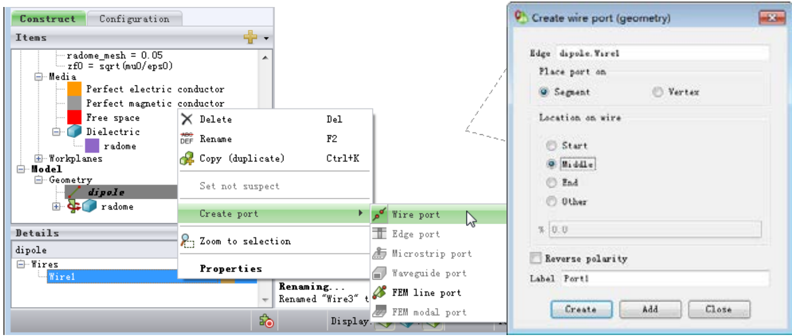


图 6-47　设定端口“Wire Port”

（10）电参数与求解设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置。展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

激励设置。在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Voltage Source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 6-48 所示。

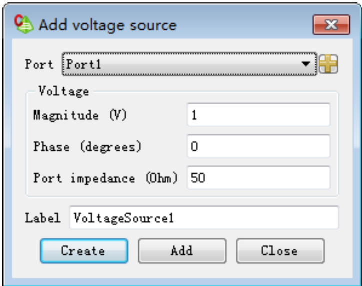


图 6-48　添加电压源激励

辐射远场设置。在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮，修正步长“Increment”中 Theta 的值为 2，在“Label”文本框中输入“ff3D”，单击“Add”按钮，如图 6-49 所示。

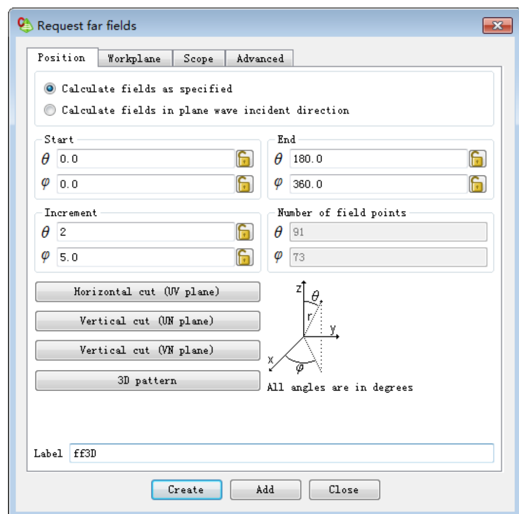


图 6-49 设置 3D 方向图

单击“Vertical cut (UN plane)”按钮，修正步长“Increment”中 Theta 的值为 1，在“Label”文本框中输入“ffXOZ”，单击“Create”按钮，如图 6-50 所示。

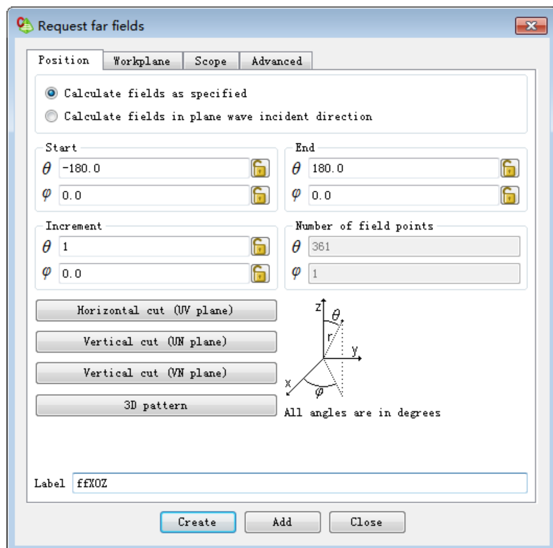


图 6-50 设置 XOZ 平面方向图

求解方法设置。单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，选择“MLFMM/ACA”选项卡，选中“Solve model with the multilevel fast

multipole method (MLFMM)”单选按钮。

为了加速迭代，可以修正 MLFMM 的预调件（默认预调件是 SuperLU-8193，也可以选择 SPAI-8192）和迭代残差（0.009 的计算精度已经足够，默认值是 0.003），这里选择默认的 8193 预条件，迭代残差设置为 0.01。

在“Solver settings”对话框中，选择“Preconditioner”选项卡，设置如下。

Stopping criterion for residuum：0.01。

Preconditioner：Default(recommended)。

单击“OK”按钮，如图 6-51 所示。

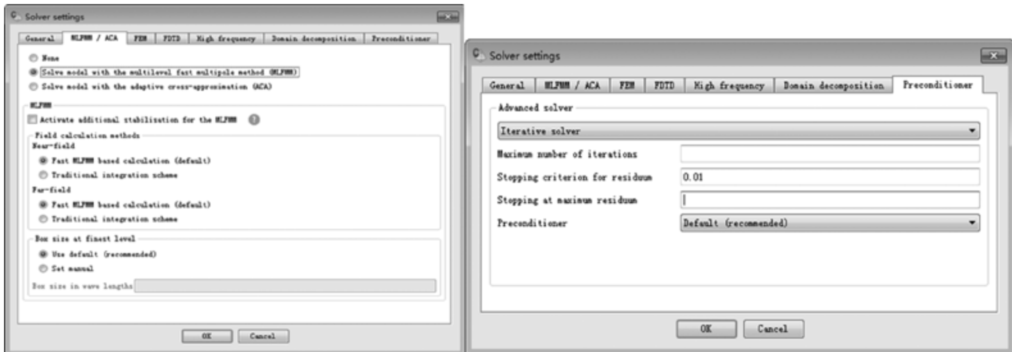


图 6-51　求解器与预条件设置

（11）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形面元棱边长度“Triangle edge length”：lam/6。

线段剖分单元长度“Wire segment length”：lam/15。

线段剖分单元半径“Wire segment radius”：lam/90。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 6-52 所示。

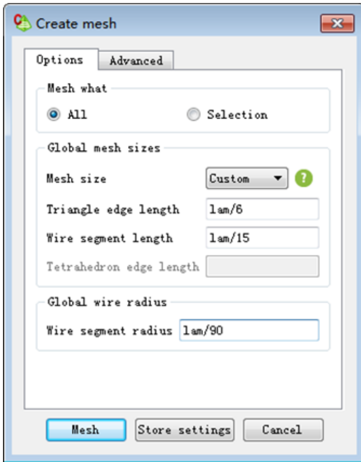


图 6-52　网格划分

（12）阵列的生成

由于阵列的单元（93 个）比较多，因此，在 CADFEKO 中为每个单元设定端口和激励效率相对比较低。由于阵列的单元尺寸是相同的，因此，可以在 EDITFEKO 中通过循环来快速生成阵列，并完成对端口激励信号的快速定义。为了保证 CADFEKO 与 EDITFEKO 设置的一致性，进入 EDITFEKO 界面时，可以锁定 CADFEKO 中的求解设置，操作如下。

在 CADFEKO 中，先保存工程文件，单击“Solve/Run”菜单中的“EDITFEKO”按钮，启动 EDITFEKO，弹出“Disable CADFEKO Solution configuration?”对话框，如图 6-53 所示，单击“Yes”按钮即可进入 EDITFEKO 界面。

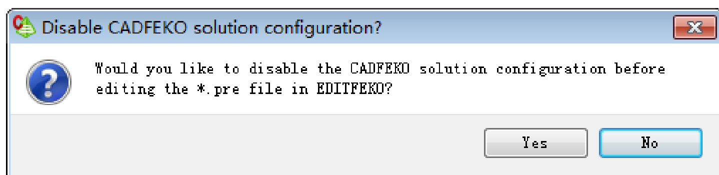


图 6-53　启动 EDITFEKO

每一个工程文件都会对应一个脚本文件（扩展名为.pre），该工程自动生成的脚本如图 6-54 所示，可以发现在该脚本中包含了计算方法、材料设置、求解设置、激励、计算远场等全面信息。接下来需要在 IN 函数下写循环生成天线阵列，采用 TG 函数来复制、平移、旋转天线单元，在 Sources 部分写循环来对端口进行信号加载。

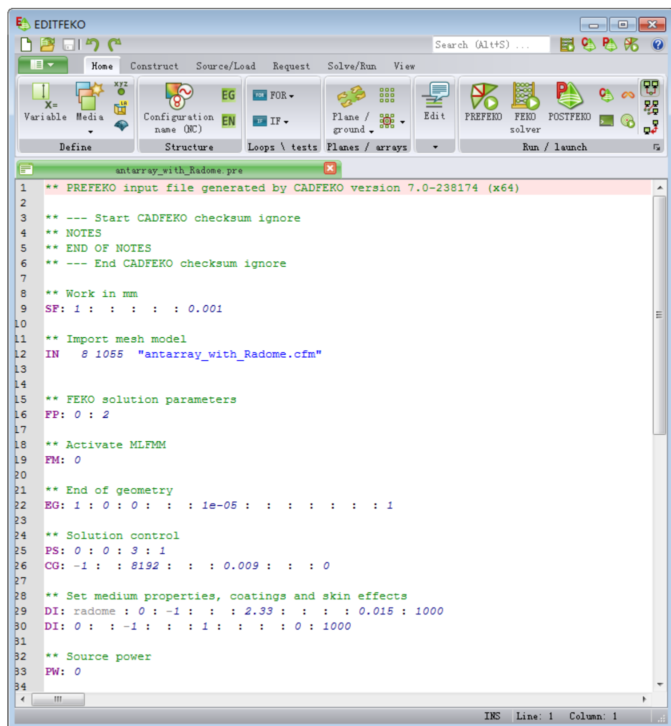


图 6-54　EDITFEKO 脚本

把如下脚本（或从附带的脚本文件“arrayGeneration.txt”中复制）复制到 IN 函数的下边（注意，TG 命令行的 dipole.wire1 要和 CADFEKO 中的一致）。

```
** Generate the array
!!for #i=1 to 92
#x=fileread("arrayLayOut.inc",#i+2,1)
#y=fileread("arrayLayOut.inc",#i+2,2)
#z=fileread("arrayLayOut.inc",#i+2,3)
TG：1 ：dipole.wire1 ：dipole.wire1 ：#i ：2 ：  ：  ：  ：#x ：#y ：#z
TG：1 ：dipole.wire1.port1 ：dipole.wire1.port1 ：#i：2 ：  ：  ：  ：#x ：#y ：#z
!!next
```

复制之后，EDITFEKO 中的脚本如图 6-55 所示。

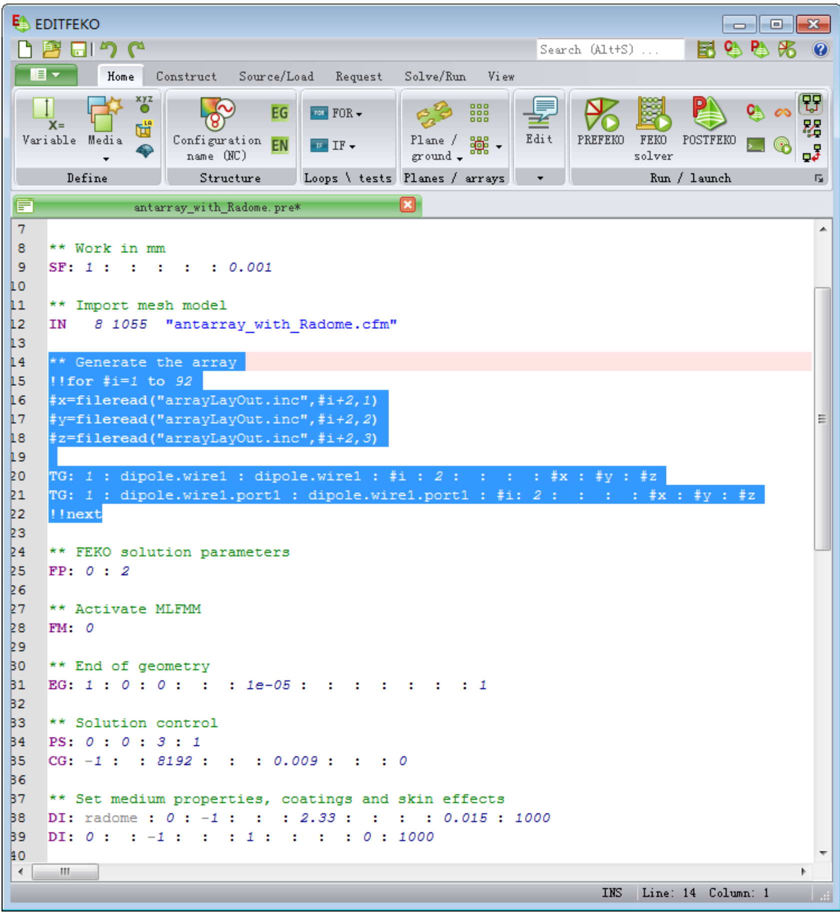


图 6-55　修正 EDITFEKO 脚本

说明：函数 fileread( )实现从某文件中（如“arrayLayOut.inc”）读取某行、某列的数值，“#x=fileread("arrayLayOut.inc",#i+2,1)”是从文件“arrayLayout.inc”中读取第 i+2 行、1 列的数据并赋给变量 x。

把光标定在“Sources”下边，把 A1 一行注释掉，即在 A1 前边添加“**”。把如下脚本

复制到 A1 一行的下边（或从附带的脚本文件“arraySource.txt”中复制）。

```
!!for #i=1 to 93
!!if #i=1 then
A1： 0 ： dipole.Wire1.Port#i ： 0 ：  ：  ： 1 ： 0 ** VoltageSource1
!!else
A1： 1 ： dipole.Wire1.Port#i ： 0 ：  ：  ： 1 ： 0 ** VoltageSource#i
!!endif
!!next
```

修改后的 EDITFEKO 脚本如图 6-56 所示。

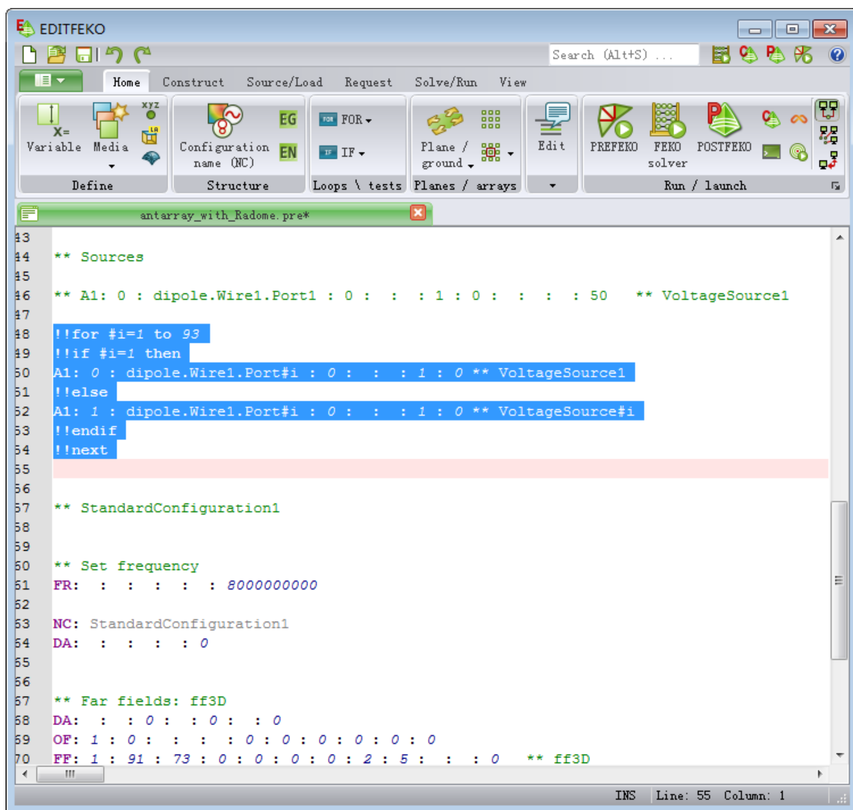


图 6-56　修正 EDITFEKO 脚本

在 EDITFEKO 中保存修改。把“…/chapter06/app2/Include/”中的“arrayLayOut.inc”复制到当前工程文件所在的路径下。

单击“Solve/Run”菜单中的“PreFEKO”按钮，检查有无错误，无误之后，可以单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮来提交计算（也可以关闭 EDITFEKO，在 CADFEKO 中提交计算，效果是一样的），这里采用在 CADFEKO 中提交计算。

（13）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

启动 POSTFEKO 之后，默认的显示是 3D 视图方式，单击“Far Field”按钮，选择“ff3D”，显示 3D 辐射方向图，如图 6-57 所示，在右侧面板中，勾选“dB”复选框。

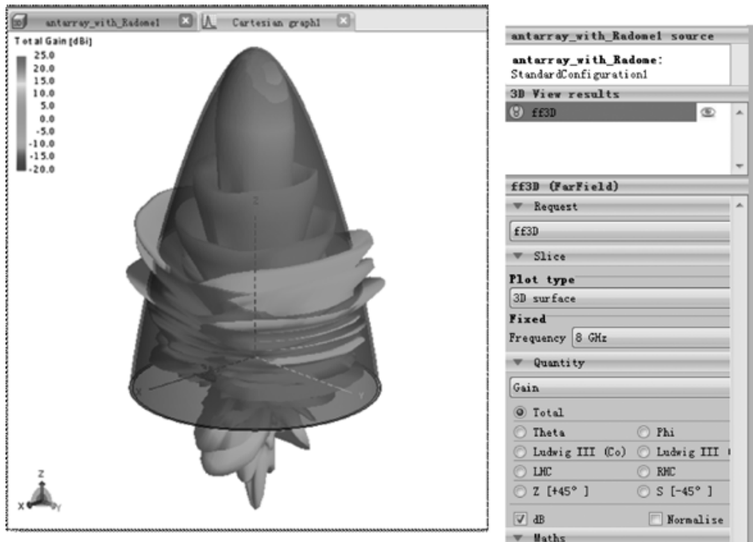


图 6-57　3D 方向图

（14）显示 2D 结果

单击“Home”菜单中的“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Far field”按钮，选择“ffXOZ”，显示 2D 方向图，如图 6-58 所示，在右侧面板中，勾选“dB”复选框。

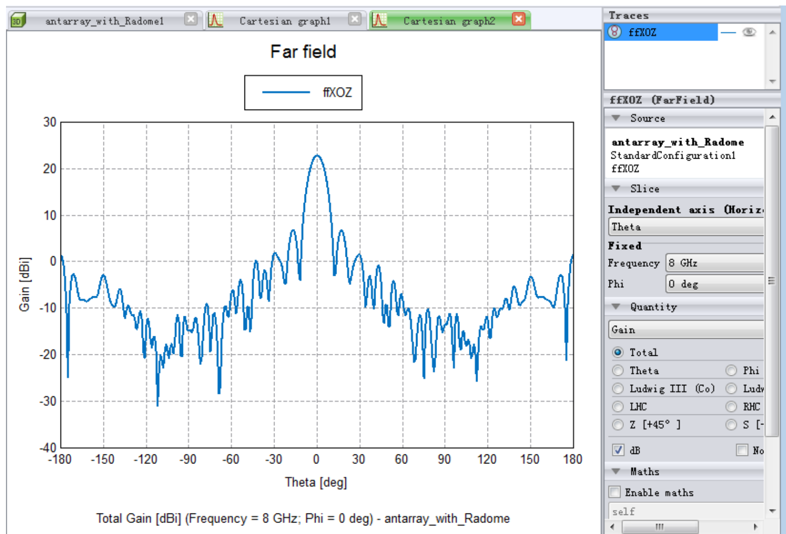


图 6-58　2D 方向图

不要关闭 POSTFEKO，单击保存。

（15）天线阵列辐射计算

在 CADFEKO 中，把“antarray_with_radome.cfx”另存为“antarray_only.cfx”，在左侧

的树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，选中“radome”，单击鼠标右键，选择“Delete”选项。只保留了“dipole”和“ref”。

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮提交计算。计算完成后，切换到已经打开的 POSTFEKO，进入到已经显示的“Cartesian”直角坐标系中。单击“Home”菜单中的“Add Model”按钮，选择“antarray_only.bof”，即可把天线阵列的辐射结果读进来，以便和带天线罩时的辐射方向图放在一起比较。从图 6-59 中可以看出以下两点：

1）主瓣增益。天线罩使得天线的最大增益下降了约 24.8687−22.8878=1.98dB。

2）第一副瓣电平 SLL 抬高了 17.7031−16.0305=1.6726dB，工程是把两条曲线归一化，然后比较 SLL 的变化：(16.0305−22.8878)−(17.4031−24.8687)=0.6083dB。

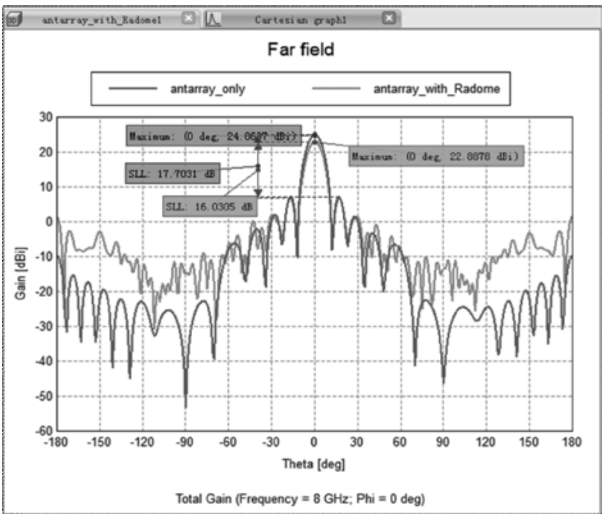


图 6-59　天线罩前后 XOZ 极化面增益方向图对比

6.3　天线罩瞄准误差（BSE）仿真

天线罩瞄准误差（BSE）又称为指向误差、波束偏转，是指有无天线罩时，天线主瓣指向的角度差绝对值。在单脉冲 PD 雷达体制中，定义为差瓣零深指向角的变化，如图 6-60 所示。

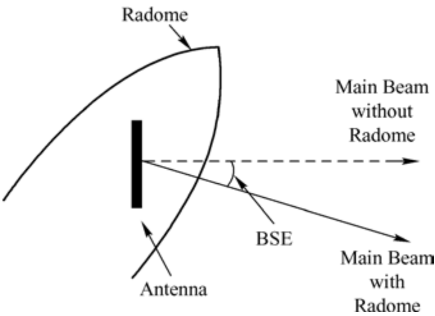


图 6-60　瞄准误差定义

通常，工程上多采用相控阵天线，这时，天线与天线罩之间的相对位置固定，随着天线阵各单元相位加权的变化，天线的主瓣指向也发生改变。

对于天线罩瞄准误差的仿真，这里以机械扫描雷达为例，假设天线不动，即天线方向图的主瓣指向不变（指向 Z 轴），而旋转的是天线罩，下面简要介绍以下两种方法的实现：

1）在 FEKO 中采用扫参的方法（Grid Search），并通过 LUA 脚本来获取 BSE 曲线。

2）采用 Matlab 控制 FEKO 求解器，并通过 Matlab 代码读取 FEKO 的输出文件。

6.3.1 FEKO软件的仿真实现

参考 6.2 节中的天线罩示例，在 CADFEKO 中把“antarray_with_Radome.cfx”另存为“antarray_with_Radome_BSE.cfx”，我们将采用 OptFEKO 中的 GridSearch 来进行扫参，自变量为天线罩的旋转角度。

（1）定义参量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中展开“Definitions”→“Variables”结点，双击“Variables”结点，在弹出的“Create variable”对话框中定义变量 angle，初始值设为 0。

（2）释放网格，锁定几何模型

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中展开“Model”→“Geometry”结点，选中“radome”模型，单击鼠标右键，选择“Unlink mesh”选项，即从几何模型中释放网格，名称为“radome_1”。

选中“radome”模型，单击鼠标右键，选择“Include/Exclude”选项，即锁住该模型，将不再参与计算，如图 6-61 所示。

注意，从几何模型中释放出网格的目的是在进行天线罩旋转计算时，只做模型的旋转，而无须进行网格的重新生成，这样会节约天线罩网格划分的时间，尤其是对于复杂的天线罩模型。

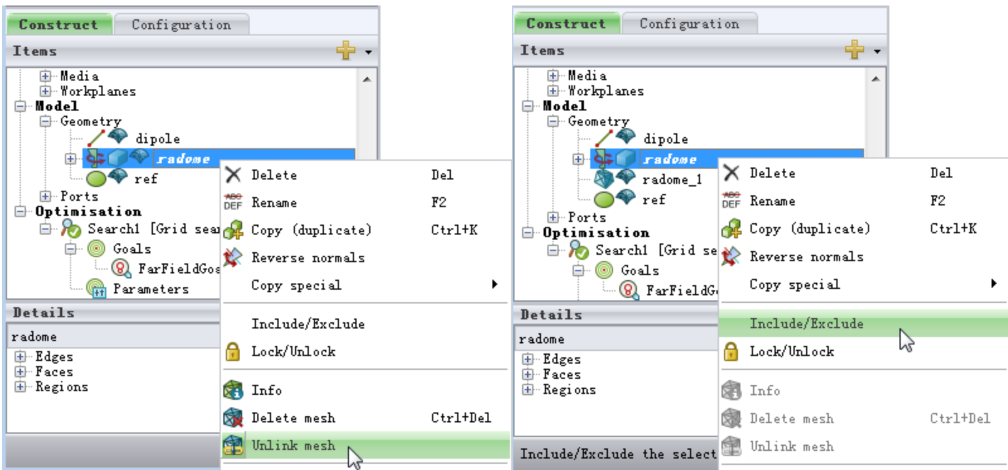


图 6-61 仿真网格释放与几何模型的锁定

（3）网格模型的旋转设置

选中释放后的“radome_1”仿真模型，单击鼠标右键，选择“Transform”→“Rotate”选项，弹出“Rotate”对话框，进行如下设置。

Axis direction：(U：0.0, V：1.0, N：0.0)。

Rotation Angle[degree]：angle。

单击“OK”按钮，如图 6-62 所示。

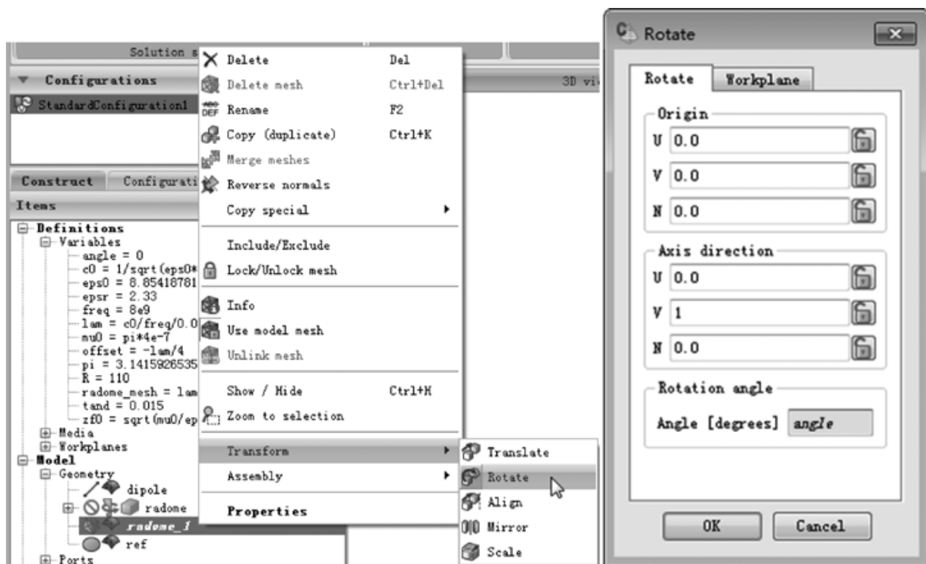


图 6-62　设置模型的旋转（绕 y 轴旋转 angle）

（4）激活求解设置并修改

进入“Solve/Run”菜单，单击“Enable Solution”按钮激活 CADFEKO 中的求解设置。

在左侧的树形浏览器中，选择“Configuration”选项卡，展开“configuration Specific”中的“Requests”→“Far fields”，选中“ff3D”删除，双击“ffXOZ”弹出“Modify far fields”对话框，进行如下设置。

Start：(θ：−1, φ：0.0); End：(θ：1, φ：0.0)。

Increment：(θ：0.001, φ：0.0)。

Label：ffXOZ。

单击“OK”按钮，如图 6-63 所示。这里的 Theta 取值区间和步长，完全是考虑瞄准误差的值比较小，以保证 BSE 计算的扫描角精度但又不需要太多的数据遍历，后续脚本的处理是假设天线主瓣指向为 z 轴、天线罩绕 y 轴旋转，所以这里是在 XOZ 极化面上采样数据。

（5）设置扫参和目标函数

进入“Request”菜单，单击“Add search”按钮，弹出“Add optimisation search”对话框，进行如下设置。

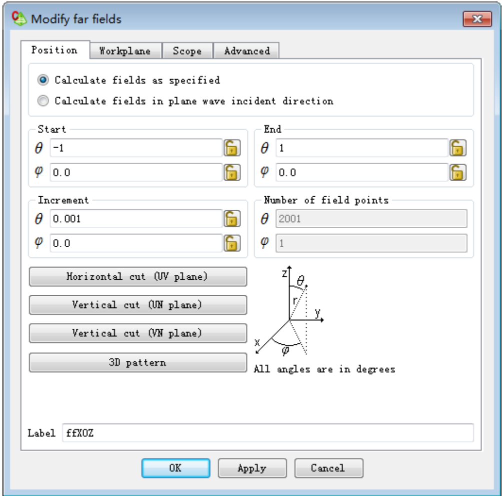


图 6-63 修改远场求解设置

Method type：Grid search。

单击“Create”按钮，如图 6-64 所示。

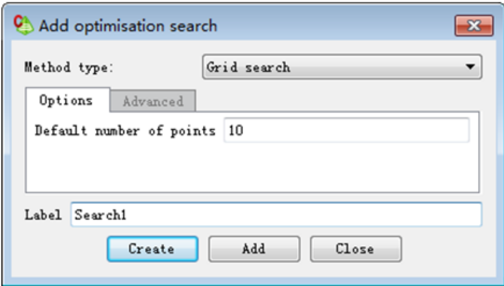


图 6-64 设置优化方法

在左侧的树形浏览器的“Construct”选项卡中，展开“optimisation”→“Search1[Grid search]”，双击“Parameters”结点，弹出“Optimisation parameters”对话框，进行如下设置。

Variable：angle。

Min value：−30。

Max value：30。

Start value：−30。

Grid point：61，如图 6-65 所示。

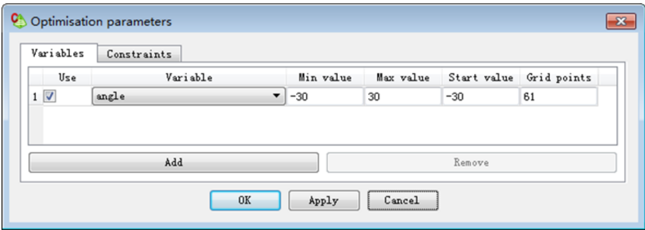


图 6-65 设置扫描参数

在左侧的树形浏览器的“Construct”选项卡中，展开“optimisation”→“Search1[Grid search]”，选中“Goals”结点，单击鼠标右键，选择“Far field goal”选项，弹出“Modify far field goal”对话框，进行如下设置。

Focus source label：ffXOZ。

Focus type：Gain。

Operation：Absolute value。

Operation type：Less than。

Value：0。

单击“OK”按钮，如图 6-66 所示。

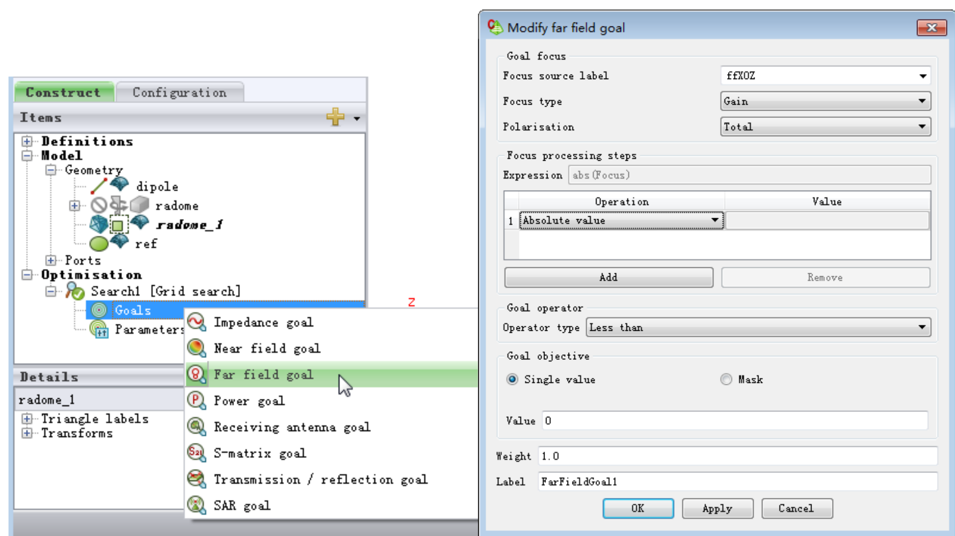


图 6-66　设置优化目标

（6）重新编辑.pre 脚本

在 CADFEKO 的“Solve/Run”菜单中，单击“EDITFEKO”按钮，单击“Disable CADFEKO solution configuration?”对话框中的“Yes”按钮，在 EDITFEKO 编辑器中进行如下操作。

把如下脚本（或从附带的脚本文件 arrayGeneration.txt 中复制）复制到 IN 函数的下边（注意，TG 命令行的 dipole.wire1 要和 CADFEKO 中的一致）。

```
** Generate the array
!!for #i=1 to 92
#x=fileread("arrayLayOut.inc",#i+2,1)
#y=fileread("arrayLayOut.inc",#i+2,2)
#z=fileread("arrayLayOut.inc",#i+2,3)
TG: 1 : dipole.wire1 : dipole.wire1 : #i : 2 :  :  : : #x : #y : #z
TG: 1 : dipole.wire1.port1 : dipole.wire1.port1 : #i: 2 :  :  : : #x : #y : #z
!!next
```

把光标定位在“Sources”的下边，把 A1 一行注释掉，即在 A1 前边添加“**”。把如下

脚本复制到 A1 一行的下边（或从附带的脚本文件 arraySource.txt 中复制）。

```
** Sources
!!for #i=1 to 93
!!if #i=1 then
A1： 0 ： dipole.Wire1.Port#i ： 0 ：  ：  ： 1 ： 0 ** VoltageSource1
!!else
A1： 1 ： dipole.Wire1.Port#i ： 0 ：  ：  ： 1 ： 0 ** VoltageSource#i
!!endif
!!next
```

修改后的 EDITFEKO 脚本如图 6-67 所示。

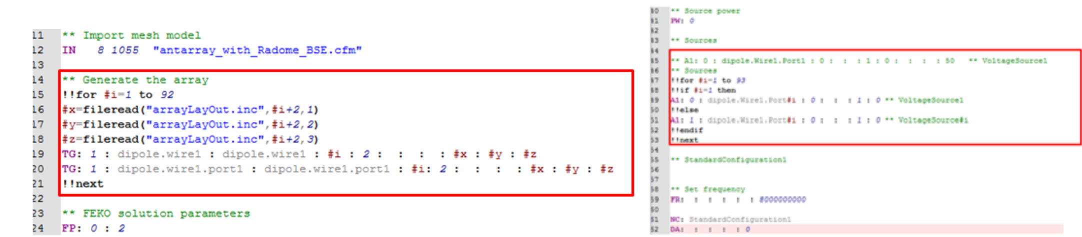


图 6-67　EDITFEKO 脚本

在 EDITFEKO 中，保存做过的修改，退出 EDITFEKO。把“…/chapter06/app3/Include/”中的“arrayLayOut.inc”复制到当前工程文件所在的路径下。

（7）提交 OptFEKO 计算

在 CADFEKO 的“Solve/Run”菜单中，单击“OptFEKO”按钮（或按〈Alt+6〉快捷键），提交优化计算，如图 6-68 所示。

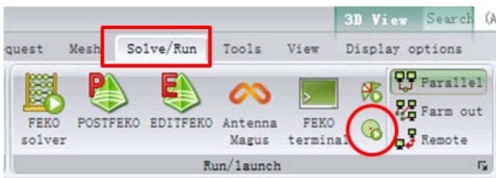


图 6-68　启动优化计算

计算完成后，在工作目录下可以看到有 61 个中间工程文件，如 antarray_with_Radome_BSE_opt_1，antarray_with_Radome_BSE_opt_2，……，antarray_with_ Radome_BSE_opt_61。

（8）显示结果

在 CADFEKO 的“Solve/Run”菜单中，单击“POSTFEKO”按钮（或按〈Alt+3〉快捷键），启动后处理模块 POSTFEKO。

这里要用到 LUA 脚本（链接资源位于“…/chapter06/app3/Include/”中的“Radome_BSE_Start_From_Log_File_alt.lua”）来分别读取各个旋转角度下的远场数据，并处理得到最大增益对应的角度，从而得到瞄准误差曲线。

部分 Radome_BSE_Start_From_Log_File_alt.lua 脚本如图 6-69 所示。

```
-- 创建窗体读取日志文件
form = pf.Form.New("选择打开optFEKO Log文件")
--- Create 'FormFileBrowser' and adjust its initial settings
fileBrowser = pf.FormFileBrowser.New("OptFEKO-Log文件:")
fileBrowser:SetFilter("*.log")
fileBrowser.MultiSelect = false
form:Add(fileBrowser)
-- 运行窗体（Form），返回用户的选择（输入）
okPressed=form:Run()

if okPressed==true then
selectedPath = fileBrowser.Value
```

图 6-69　资源脚本 1

上述 LUA 脚本的主要功能是创建一个 Form 窗体，选择要处理的工程文件的优化日志文件，如该例中的“antarray_with_Radome_BSE.log”。执行完这一部分代码后，会返回文件的路径和文件的名称，接下来要执行如图 6-70 所示的 Lua 脚本。

```
if okPressed==true then
selectedPath = fileBrowser.Value

-- print(selectedPath[1])
-- 提取文件名和路径
slash_pos=string.find(string.reverse(selectedPath[1]),"/")  --查找最后一个反斜杠的位置
path_Len=string.len(selectedPath[1])
fileName=string.sub(selectedPath[1],path_Len-slash_pos+2,path_Len-4)
filePath=string.sub(selectedPath[1],1,path_Len-slash_pos+1)

-- 文件（*.log）打开遍历
-- 查找行数"No.     angle          search1.goals.f  Global goal      Global best aim"
-- line_Flag = true 表示是需要的行，line_Flag=false 表示不需要的行
line_Flag=false
line_special_str="No.  Name                    Quantity       Minimum       Maximum       Step"

--local file_read=io.open(selectedPath[1],"r")
local file_read=io.open(filePath.."antarray_with_Radome_BSE.log","r")
for linevalue in file_read:lines() do
    a=string.find(linevalue,line_special_str)
    if line_Flag == true then
       ta=lua_string_split(linevalue," ")  -- 注意函数"lua_string_split"：开头有空格与否，会影响结果

       break  --退出循环
    end
    if a > 0 then
       line_Flag=true
       print(linevalue)
    end
end
file_read:close()
```

图 6-70　资源脚本 2

上述 LUA 脚本的主要功能是遍历文件“antarray_with_Radome_BSE.log”，返回扫描角度 angle 参数取值的名称、最小值、最大值、步长以及扫描角取值个数，并存储在 ta 数组表中，脚本如图 6-71 所示。

```
-- 新建一个FEKO PostFEKO应用，打开计算过程中的文件查找最大增益对应的角度
para_name=ta[3]
para_no=tonumber(ta[4])
para_min=tonumber(ta[5])
para_max=tonumber(ta[6])
para_step=tonumber(ta[7])
print(para_name,para_no,para_min,para_max,para_step)
-- loop open postfeko循环打开
app = pf.GetApplication()
app:NewProject()

--生成一个直角坐标系（后续完善）
-- 创建一个用户自定义数据集
custom=pf.DataSet.New()

custom.Axes:Add("Scan", "deg", para_min,para_max,para_no)
custom.Quantities:Add("Radome_BSE", pf.Enums.DataSetQuantityTypeEnum.Scalar, "deg")
-- inspect(custom)
-- print(custom)
```

图 6-71　资源脚本 3

上述 LUA 脚本要实现的功能是从 ta 数组中提取扫描参数 angle 的信息并赋给相应的变量，同时生成一个新的 POSTFEKO 应用，定义一个数据集“custom”，其自变量为扫描参数，包含最小取值、最大取值以及个数等，并为其定义一个物理量“Radome_BSE”，单位为

“deg”，脚本如图 6-72 所示。

```
for i=1,para_no do
    modelName = fileName.."_opt_"..i
    app:OpenFile(filePath..modelName..".bof")
    config = app.Models[modelName].Configurations[1]
--      print(modelName)
--      names = pf.FarField.GetNames()
--      printlist(names)
--      farField = pf.FarField.GetDataSet(names[i])
    farField = config.FarFields["ffXOZ"]:GetDataSet()
   -- Get the maximum Gain 以及最大增益对应的角度
    -- 初始化参数
    maxGain=0.0
    thetaValue=0.0
    axis_theta_No=farField.Axes[2].Count
    axis_theta_Start=farField.Axes[2].Values[1]
    axis_theta_End=farField.Axes[2].Values[axis_theta_No]

    E_total_Value=0.0
    theta_value_tmp=0.0
    for ii=1,axis_theta_No do
        E_total_Value=math.sqrt((farField[1][ii][1].EFieldTheta:Magnitude())^2+(farField[1][ii][1].EFieldPhi:Magnitude())^2)
        theta_value_tmp=farField.Axes[2].Values[ii]
    --      print(E_total_Value)
        if E_total_Value>maxGain then
           maxGain=E_total_Value
           thetaValue=theta_value_tmp
        end
    end
--      print(thetaValue)
    custom[i].Radome_BSE=thetaValue
end
inspect(custom)
customStoredData = custom:StoreData("Custom")
customStoredData.Label = fileName
```

图 6-72　资源脚本 4

上述 LUA 脚本要实现的功能是遍历所有扫描角对应计算结果文件“*_opt_?.bof”的远场数值，通过循环，得到最大增益所对应的 Theta 值，并返回该值。

（9）调用并运行脚本

在 POSTFEKO 的“Home”菜单中，单击“Script editor”按钮，弹出“Script editor”界面，单击左上角“New”下拉菜单右侧的“Open Script”按钮“ ”，如图 6-73 所示，选择读入“Radome_BSE_Start_From_Log_File_alt.lua”。



图 6-73　启动 Script editor

在“Radome_BSE_Start_From_Log_File_alt.lua”中的脚本如图 6-74 所示。



图 6-74　脚本编辑器界面

在“Script editor”中，单击“脚本调试工具”中的“Run script”按钮“”，运行该脚本，得到其瞄准误差数据列表如图 6-75 左所示。

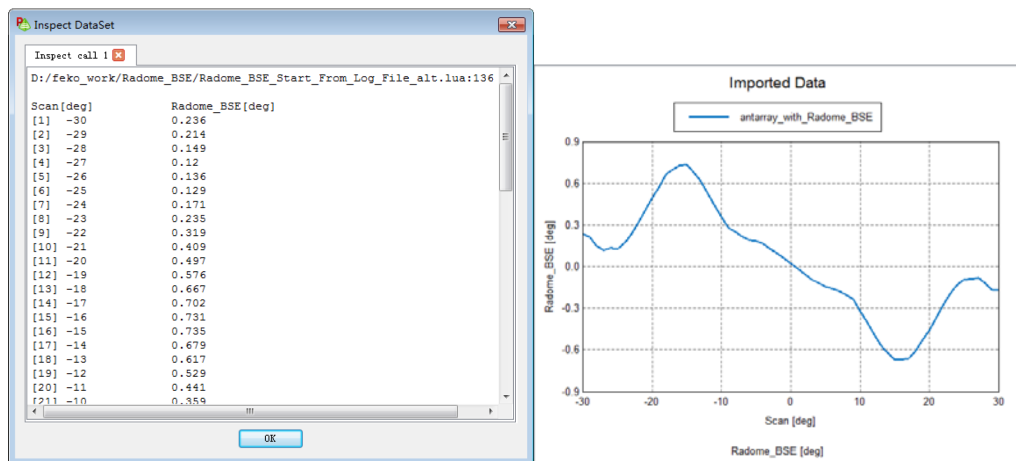


图 6-75 天线罩的瞄准误差列表（左）与曲线（右）

在 POSTFEKO 中，单击“Home”菜单中的“Cartesian”按钮，生成一个直角坐标“Cartesian Graph”，单击“Imports+Scripts”按钮“”，选择“antarray_with_Radome_BSE”，如图 6-76 所示，得到的瞄准误差曲线如图 6-75 右所示。

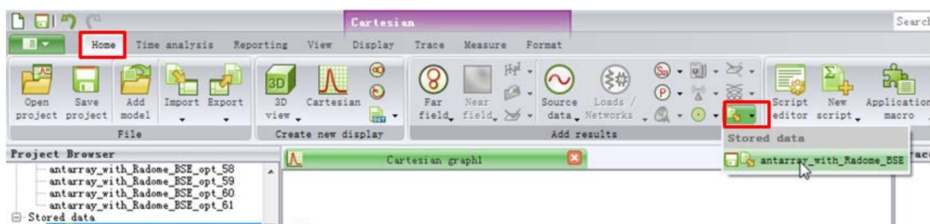


图 6-76 读入瞄准误差曲线

6.3.2 与MATLAB联合实现

MATLAB 具有强大的数学处理和画图等功能，而且脚本语言易用性好，易于掌握，应用非常广泛，所以可以应用 MATLAB 来编写循环脚本，在循环中可以调用 FEKO 的预处理和求解器，并读取 FEKO 计算的结果返回需要的数据并作图。MATLAB 调用 FEKO 中的几个主要命令如下。

1）调用 FEKO 的网格重构（更新.cfx 文件）：dos('cadfeko_batch.exe antarray_with_Radome_BSE.cfx –#angle=???')。

2）调用 FEKO 的预处理器（生成.fek）：dos('prefeko.exe antarray_with_Radome_BSE.pre')。

3）调用 FEKO 求解器（生成.bof 和.out）：dos('runfeko.exe antarray_with_Radome_BSE.fek')。

同样，也可以采用并行的方式来提交，参见前面章节中的说明，或直接查看 runfeko 所

对应的命令。

调用 FEKO 求解器计算会生成.out 文本格式的结果文件，可以采用 MATLAB 读写文本的脚本来提取或遍历相关数据，得到最大增益所对应的 Theta 值。

MATLAB 调用 FEKO 的主要流程如下：

首先，在 CADFEKO 中设置天线罩的旋转并对旋转角度参数化。

然后在 MATLAB 中编写循环：

1）参数定义。

2）MATLAB 循环开始（iAngle）。

3）dos ('cadfeko_batch.exe antarray_with_Radome_BSE.cfx −#angle ='iAngle)。

4）dos('prefeko.exe antarray_with_Radome_BSE.pre')。

5）dos('runfeko.exe antarray_with_Radome_BSE.fek')。

6）文本读取 antarray_with_Radome_BSE.out，得到最大增益对应的角度。

7）MATLAB 循环终止。

8）MATLAB 画图，生成瞄准误差曲线。

也可以将对天线罩模型的旋转放在.pre 文件中处理，这时 MATLAB 的循环变量 iAngle 会对应.pre 文件中的旋转角度。在 MATLAB 的循环执行时，就不需要 dos ('cadfeko_batch.exe antarray_with_Radome_BSE.cfx −#angle ='iAngle)了。

关于 MATLAB 针对本案例的脚本，读者可以参考链接资源…/chapter06/app3/Include/中的 BSE_Matlab_FEKO_cadfeko_batch_alt.m 或 BSE_Matlab_FEKO_editfeko_pre_alt.m 文件（基于 MATLAB 2010）。

第 7 章



工程仿真案例 3——载体平台天线布局

天线安装到载体平台上以后，天线的电性能会受到影响，包括其输入阻抗和远场辐射方向图等。同时，天线放置在载体不同的位置，其所表现出来的电性能也会有很大的不同。此外，随着通信技术的快速发展，载体平台上通常集成多副天线，不同系统天线间的电磁兼容问题日益突出，天线之间的隔离度是评价载体台上设备间电磁兼容性能优劣的重要指标。工程人员面临的挑战是如何确定平台对天线辐射特性的影响，以及优化多副天线布置，以使得天线之间达到较高的隔离，减少相互干扰。在 FEKO 中对于电大尺寸载体（如飞机、船舶、卫星等）上的天线布局问题，可以采用 MLFMM、MLFMM/PO 等仿真方法分析。

7.1　FEKO 的 GridSearch 扫参技术
7.2　锥台结构平台上的多天线隔离度
7.3　直升机天线布局仿真
7.4　车内天线布局

7.1 FEKO的GridSearch扫参技术

本节将采用 GridSearch 扫参技术，分析天线隔离度随天线间距变化的规律。启动 CADFEKO，创建新的项目文件“Ant_coupling_with_GND.cfx”（完整的工程文件参见随书链接资源中的“…/chapter07/app1/Ant_coupling_with_GND.cfx”）。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Millimetres (mm)”单选按钮，如图 7-1 所示。

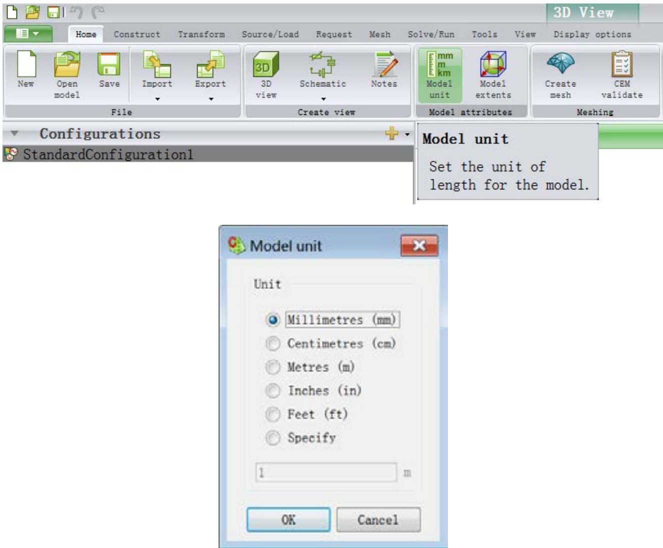


图 7-1　定义长度单位

（2）定义工作空间大小

单击“Home”菜单中的“Model extents”按钮，在“Model extents”对话框中，选择“5E+03”选项，如图 7-2 所示。

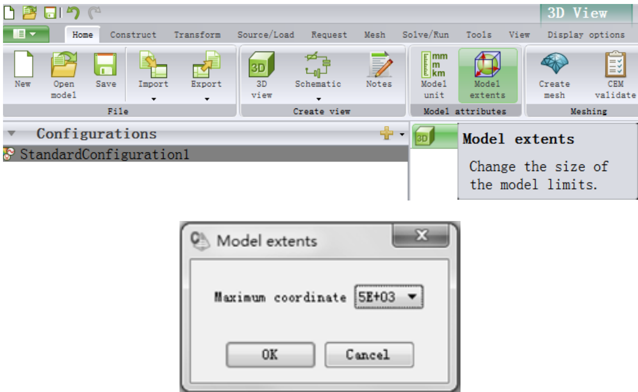


图 7-2　定义工作空间容器大小

（3）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中展开“Definitions”结点，双击“Variables”结点，弹出“Add variables”对话框，依次定义如下变量。

天线之间的间距：ant_d=400。

天线距离地面的高度：ant_h=1800。

天线的长度：ant_L=130。

频率：freq=950e6。

单位缩放系数：sf=0.001。

波长：lam=c0/freq/sf，如图 7-3 所示。

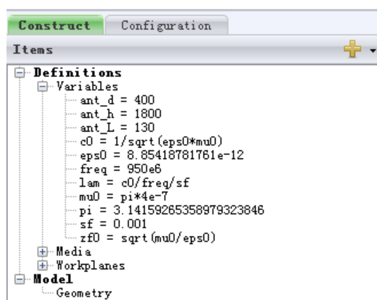


图 7-3　定义变量

（4）模型建立

单击“Construct”菜单中的“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，在“Geometry”选项卡下进行如下设置。

Start point：(U：−ant_L/2; V：0,0; N：ant_h)。

Start point：(U：ant_L/2; V：0,0; N：ant_h)。

Label：ant_1

单击“Create”按钮，如图 7-4 所示。

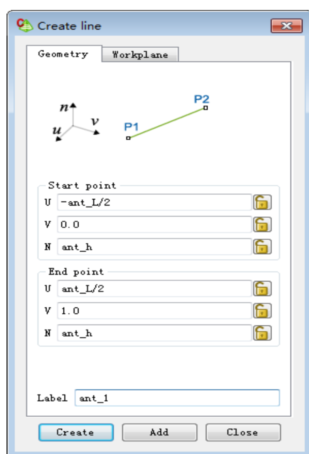


图 7-4　定义半波振子

在左侧的树形浏览器展开“Model”→“Geometry”结点，选中模型 ant_1，单击鼠标右键，选择“Copy special”→“and translate”选项，弹出“Copy and translate”对话框，进行如下设置。

From：(U：0, V：0, N：0)。

To：(U：0, V：ant_d, N：0)。Number of copies：1。

单击“OK”按钮，如图 7-5 所示。

新模型为“ant_2”。

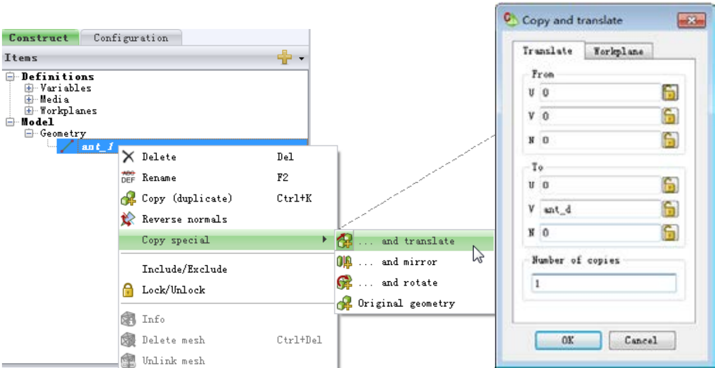


图 7-5 复制天线模型

（5）创建端口

创建 Port1：在左侧的树形浏览器中，选中模型 ant_1，展开其 Wires 结点，选择 Wire1，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，弹出“Create wire port (geometry)”对话框，进行如下设置。

Place port on：Segment。

Location on wire：Middle。

Label：Port1。

单击“Create”按钮，如图 7-6 所示。

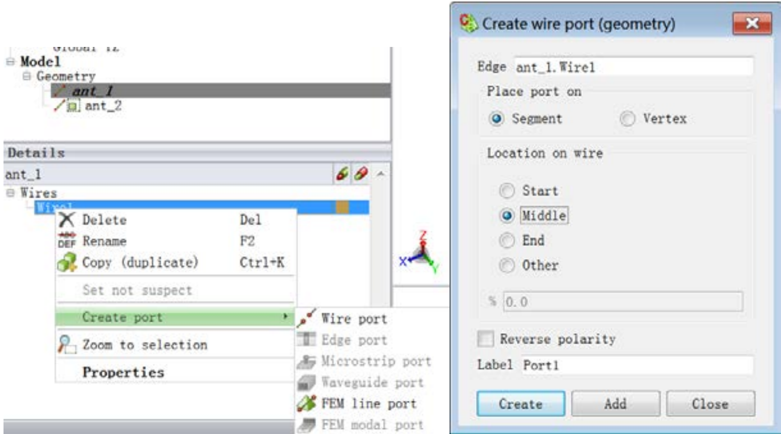


图 7-6 创建端口 Port1

创建 Port2：在左侧的树形浏览器中，选中模型 ant_2，展开其 Wires 结点，选择 Wire1，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，弹出”Create wire port（geometry）”对话框，进行如下设置。

Place port on：Segment。

Location on wire：Middle。

Label：Port2。

单击“Create”按钮，如图 7-7 所示。

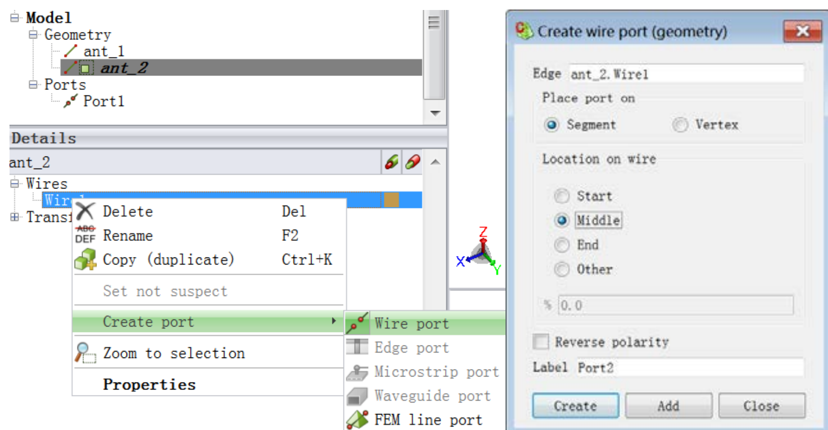


图 7-7　创建端口 Port2

（6）定义无限大地平面

进入“Construct”菜单，单击“Planes/arrays”中的“Plane/ground”，弹出“Plane/ground”对话框，选中“Perfect electric(PEC) ground plane at Z=0”单选按钮，单击“OK”按钮，如图 7-8 所示。

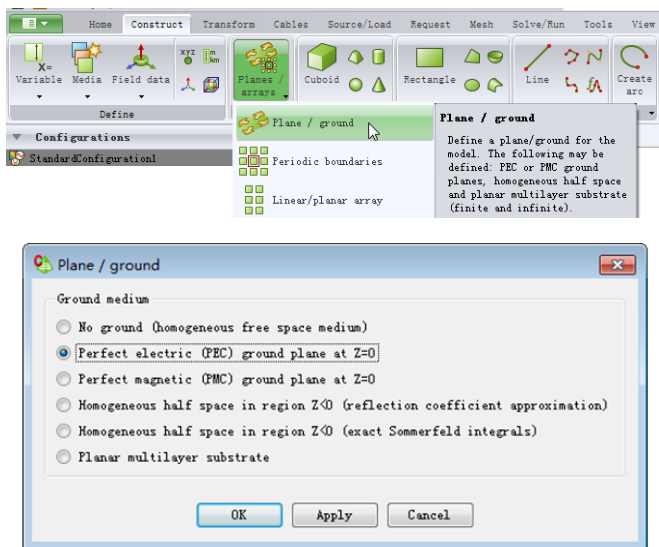


图 7-8　定义无限大地平面

（7）定义频率

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置，展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮，如图 7-9 所示。

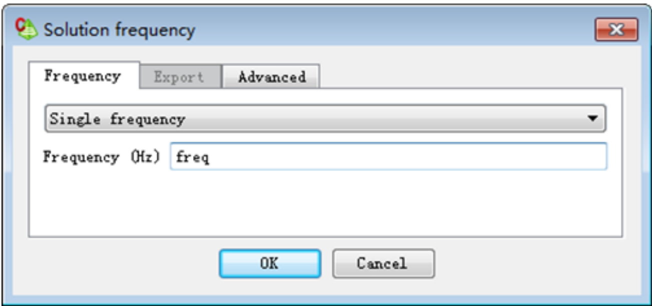


图 7-9　设置频率

（8）S-parameters 设置

在树形浏览器中，展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Multi port S-parameter”选项，弹出“Request s-parameters”对话框，进行如下设置。

单击“Add port”按钮。

Port 列：从上到下依次为 Port1、Port2。

Active 列：从上到下依次为勾选、不勾选。

单击“Create”按钮，如图 7-10 所示。

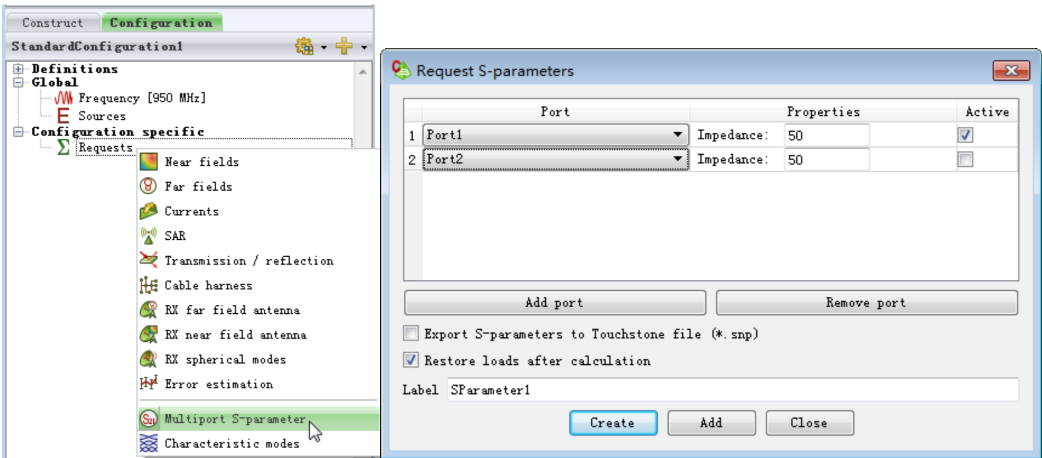


图 7-10　定义 S 参数求解

在左侧的树形浏览器上部的“Configurations”中选中“StandardConfiguration1”，单击鼠

标右键，选择“Include/Exclude”选项，如图 7-11 所示。

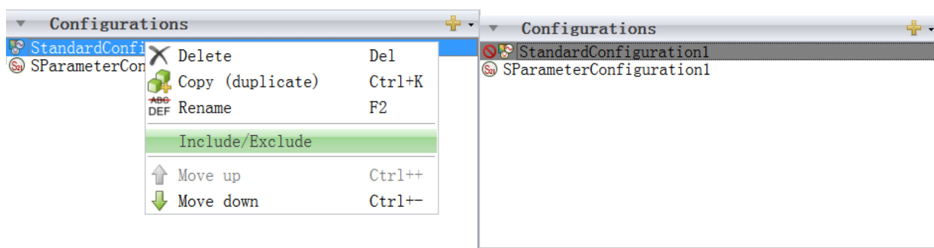


图 7-11　关闭标准求解设置

（9）优化设置

添加 Grid Search：进入“Request”菜单，单击“Optimisation”中的“Add search”按钮，弹出“Add optimization search”对话框，进行如下设置。

Method type：Gird search。

Label：Search1。

单击“Create”按钮，如图 7-12 所示。

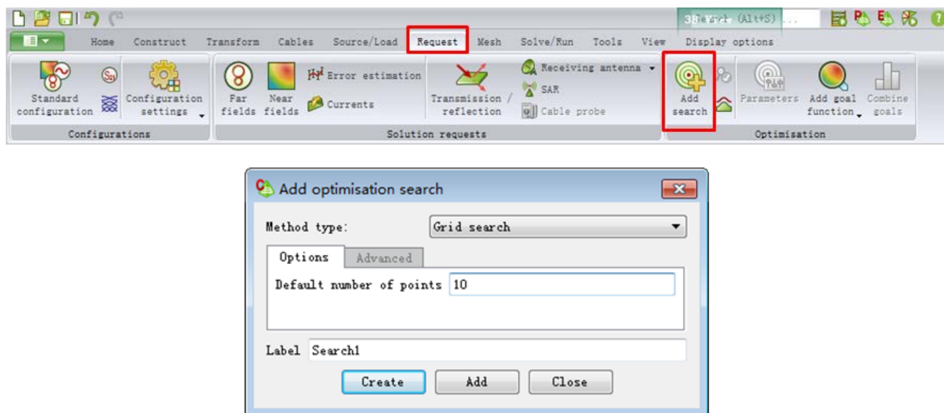


图 7-12　定义优化算法

设置自变量：在左侧的树形浏览器中，展开“Optimization”结点，双击“Parameters”结点，弹出“Optimisation parameters”对话框，进行如下设置。

Variable：ant_d。

Min value：400。

Max value：1800。

Start value：400。

Grid points：101。

单击“OK”按钮，如图 7-13 所示。

添加优化目标：在左侧的树形浏览器中展开“Optimization”结点，选中“Goals”结点，单击鼠标右键，选择“S-matrix goal”选项，弹出“Create S-parameter goal”对话框，进行如下设置。

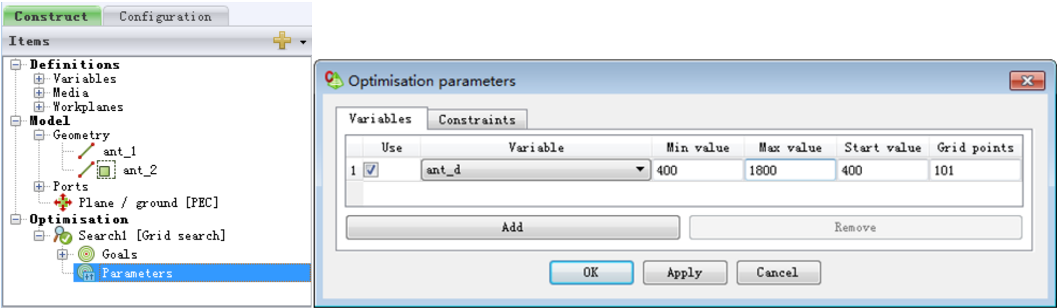


图 7-13　设置扫描参数

Focus source label：SParameter1。

Quantity：Coupling coefficient (Smn)。

勾选：Specify input port number(n)，设置值为 1。

勾选：Specify output port number(m)，设置值为 2。

取优化目标为：(log(mag(Focus)))*(20)。

单击“Add”按钮两次，继续设置。

Operation 列：从上往下依次设置为 Magnitude、Log、Scale。

Value 列：第 3 行设置为 20。

Operator type：Greater than。

Goal objective：Single value。

Value：0。

Label：SParameterGoal1。

单击“Create 按钮，如图 7-14 所示。

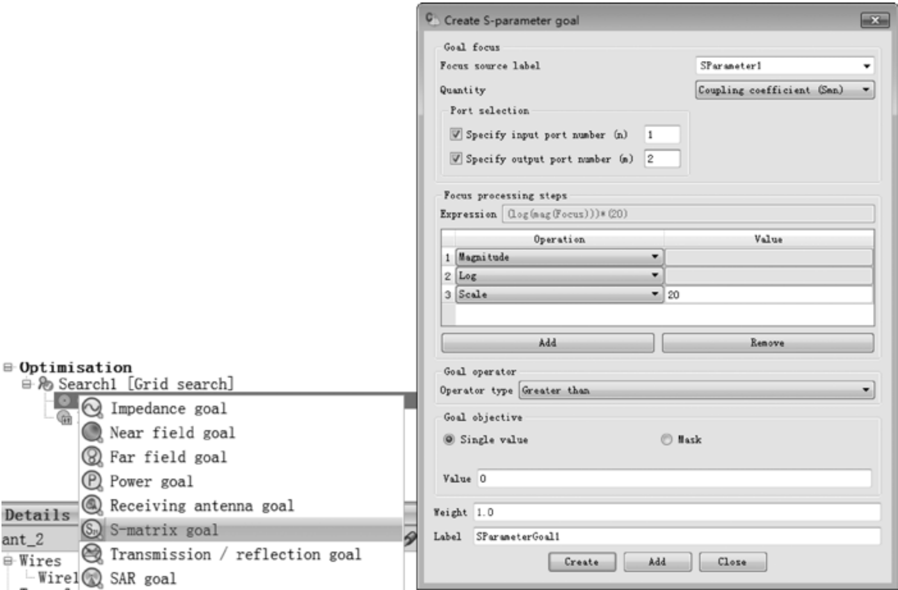


图 7-14　添加优化目标

（10）划分网格

进入“Mesh”菜单，单击“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，进行如下设置。

Mesh size：Custom。

Wire segment length：lam/15。

Wire segment radius：lam/90。

单击“Mesh”按钮，如图 7-15 所示。

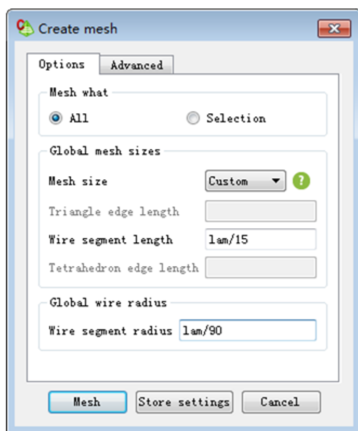


图 7-15　网格划分

（11）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“OPTFEKO”按钮，提交计算，如图 7-16 所示。

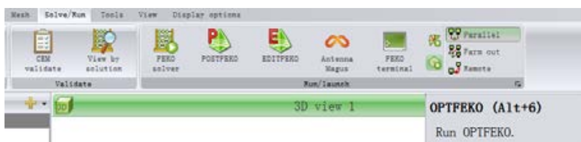


图 7-16　运行 OPTFEKO

（12）后处理显示结果

在“Solve/Run”菜单中单击“POSTFEKO”按钮，进入后处理 POSTFEKO 界面。

在“Home”菜单中，单击“Cartesian”生成 Cartesian graph1，单击“Add an Optimization results”中的“Optimisation”，如图 7-17 所示。

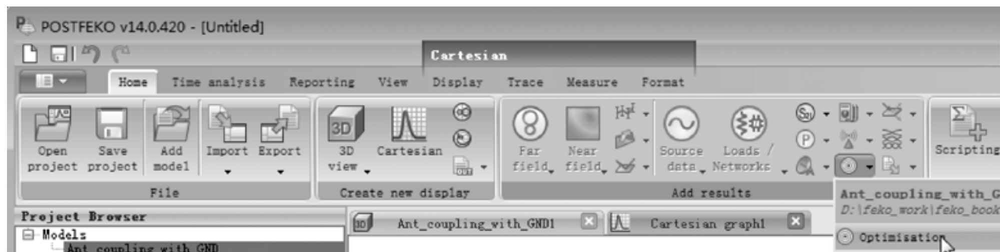


图 7-17　选择 Optimisation 结果

在右侧面板中，在“Traces”区域内选中“Optimisation”曲线。在“Fixed”区域内的“Trace”下拉列表框中选择“search1.goals.sparametergoal1”选项。

进入“Trace”菜单，单击“Transform axis(horizontal)”按钮，弹出“Transform horizontal axis”对话框，进行如下设置。

Scale：14。

Offset：386。

单击“OK”按钮，如图 7-18 所示。

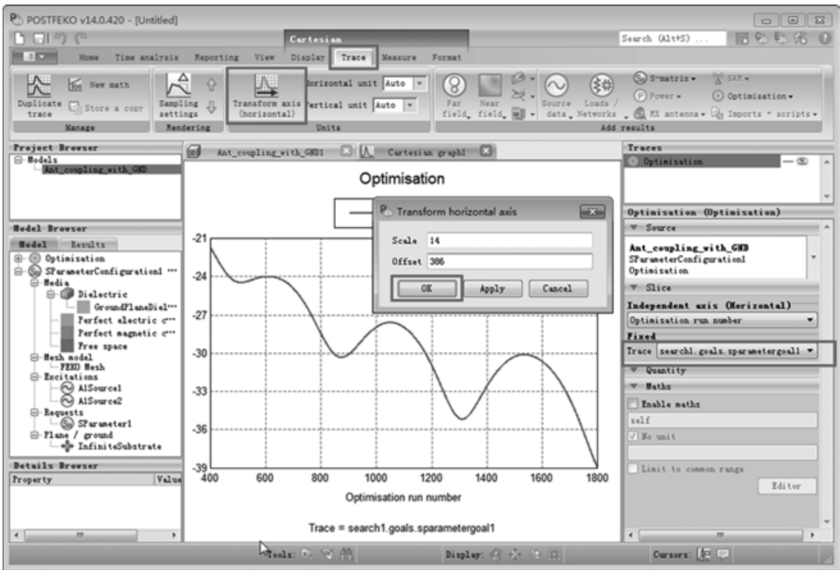


图 7-18　天线隔离度随距离变化的规律

7.2　锥台结构平台上的多天线隔离度

启动 CADFEKO，新建一个工程“multi_ants_coupling_on_cone_platform_s21.cfx”，模型几何单位采用默认 m（米）。完整的工程文件参见链接资源中的“.../chapter07/app2/completed/multi_ants_coupling_on_cone_platform_s21.cfx”。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=100e6。

工作波长：lam = c0/freq。

天线高度：ant_H=lam/4。

天线离锥台顶部的距离：ant_pos0=0.1*lam。

锥台的长度：L=3*lam。

遮挡体的位置参数（扫参参数）：dis=0。

遮挡体的起始位置：pos_start=L*0.3。

锥台顶部半径：R1=0.25*lam。

锥台底部半径：R2=0.35*lam，如图 7-19 所示。

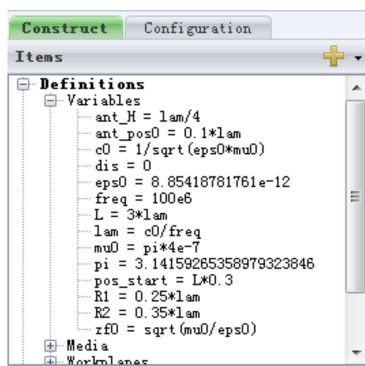


图 7-19　定义变量

（2）模型建立

锥台模型建立：单击“Construct”菜单中的“Cone”按钮，弹出“Create cone”对话框，进行如下设置。

选择“Workplane”选项卡，修改“V vector”为(X：0.0, Y：0, Z：−1)。

返回“Geometry”选项卡：

Base centre(B)：(U：0.0; V：0.0; N：−L/2)。

Base radius (Rb)：R1。

Height (H)：L。

Top radius (Rt)：R2。

Label：Cone。

单击“Create”按钮，如图 7-20 所示。

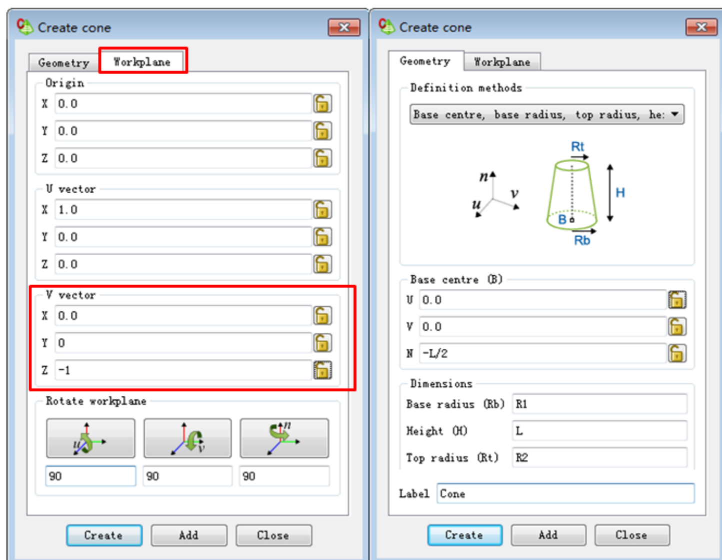


图 7-20　创建锥台模型“Cone”

在 3D 视图区域，按〈F5〉键，模型适中显示。

定义工作平面：在左侧的树形浏览器中，选中“Workplane”结点，单击鼠标右键，选择“Add workplane”选项，或直接按〈F9〉键，弹出“Create workplane”对话框。

把光标定在“Origin”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在 3D 视图中移动鼠标光标拾取图 7-21 所示位置的坐标，确定工作坐标系如图 7-21 所示，在“Label”文本框中输入“Workplane1”，单击“Create”按钮。在左侧的树形浏览器中，在“Definitions”→“Workplanes”结点下会出现新生成的“Workplane1”。

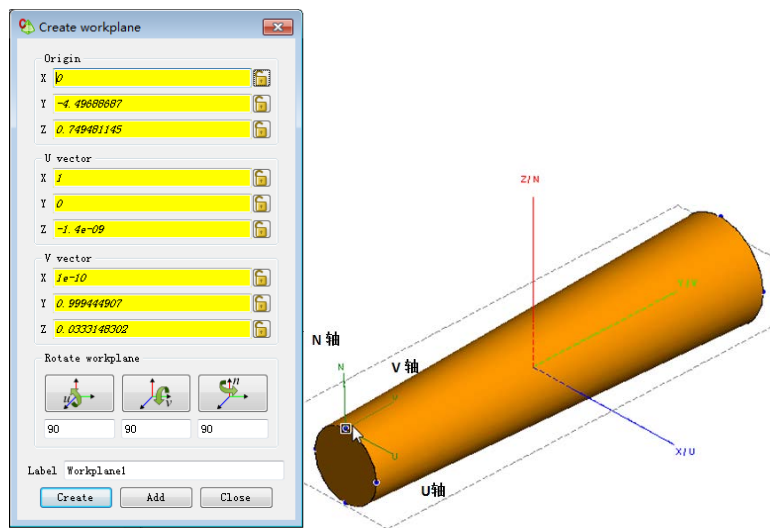


图 7-21　定义工作平面

天线模型建立：在“Construct”菜单中，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，进行如下设置。

选择“Workplane”选项卡：

把光标定位在“Origin”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉键，单击选中新建立的“Workplane1”。

返回“Geometry”选项卡：

Start point：(U：0.0; V：ant_pos0; N：0.0)。

End point：(U：0.0; V：ant_pos0; N：ant_H)。

Label：ant1。

单击“Add”按钮，继续设置。

Start point：(U：0.0; V：L-ant_pos0; N：0.0)。

End point：(U：0.0; V：L-ant_pos0; N：ant_H)。

Label：ant2。

单击“Create”按钮，如图 7-22 所示。

（3）定义天线端口

在左侧的树形浏览器中，选中新建立的天线模型“ant1”，（或在 3D 视图中，切换到线选模式，点选模型“ant1”），在左下角的“Details”中，展开“Wires”结点，选择

“Wire3”，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，弹出“Create wire port(geometry)”对话框，采用默认设置，单击“Add”按钮，如图 7-23 所示。

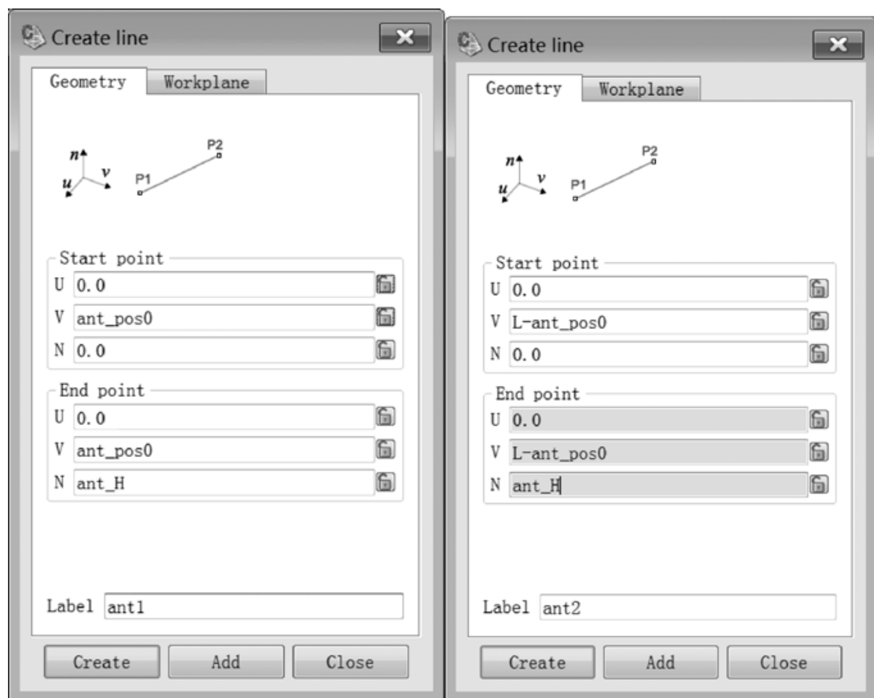


图 7-22　创建天线模型

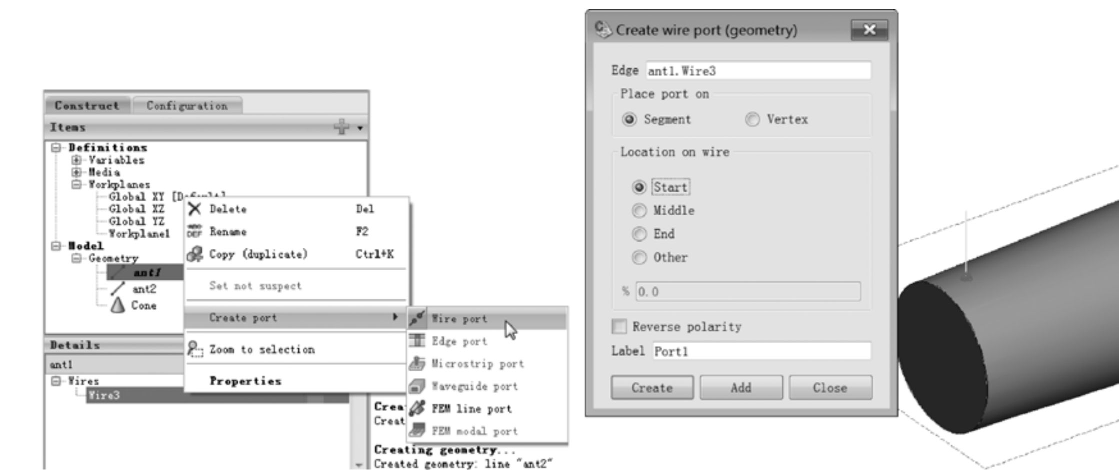


图 7-23　创建天线 1 的端口 Port1

在 3D 视图中，单击选中模型“ant2”，在“Create wire port(geometry)”对话框中单击“Create”按钮（或使用与 Port1 相同的方法创建 Port2）在模型“ant2”与锥台的交点位置上建立端口 Port2，如图 7-24 所示。

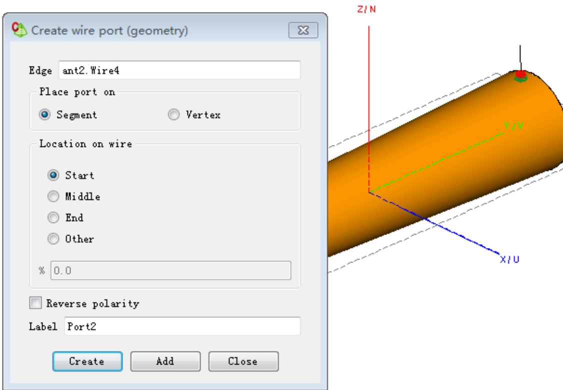


图 7-24　创建天线 2 的端口 Port2

（4）遮挡模型建立

遮挡体模型建立：在“Construct”菜单中，单击“Cuboid”按钮，弹出“Create cuboid”对话框，进行如下设置。

进入“Geometry”选项卡：

Base corner(C)：(U：-0.1*lam; V：0.0; N：0.0)。

Width (W)：0.2*lam。

Depth(D)：0.01*lam。

Height(H)：0.45*lam。

Label：Cubiod。

单击“Create”按钮，如图 7-25 所示。

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，选择新建立的“Cubiod”，单击鼠标右键，选择“Transform”→“Translate”选项，如图 7-26 所示，弹出“Translate”对话框，进行如下设置。

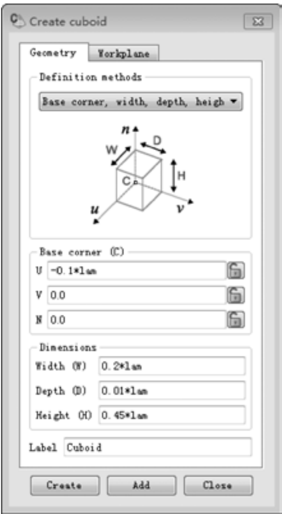


图 7-25　定义遮挡体

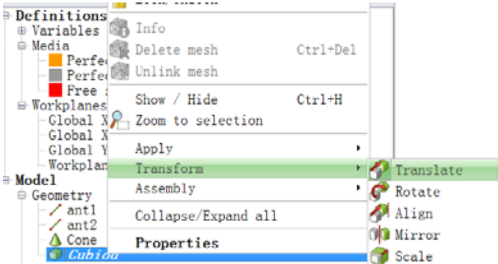


图 7-26　模型平移

进入“Workplane”选项卡，把光标定位在“Origin”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在左侧的树形浏览器中的“Workplanes”结点中，选择“Workplane1”。

进入“Translate”选项卡：

From：(U：0.0; V：0.0; N：0.0)。

To：(U：0.0; V：-pos_start; N：0.0)。

单击“OK”按钮，如图 7-27 所示。

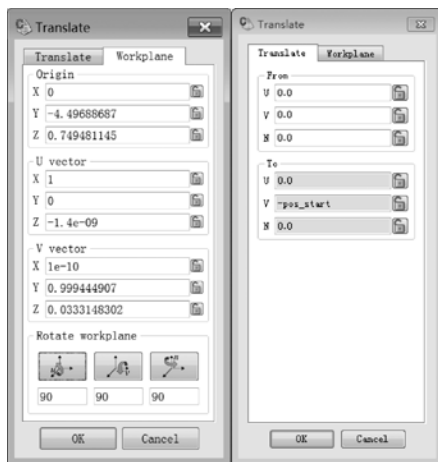


图 7-27　初始化遮挡体的位置

参数化遮挡体的位置：为便于扫参时，该模型沿着锥台的侧壁滑动，高度不变。选中模型“Cubiod”，单击鼠标右键，选择“Transform”→“Translate”选项，弹出“Translate”对话框，进行如下设置。

进入“Workplane”选项卡，把光标定位在“Origin”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在左侧的树形浏览器中的“Workplanes”结点中，选择“Workplane1”。

进入“Translate”选项卡：

From：(U：0.0; V：0.0; N：0.0)。

To：(U：0.0; V：dis; N：0.0)。

单击“OK”按钮，如图 7-28 所示。

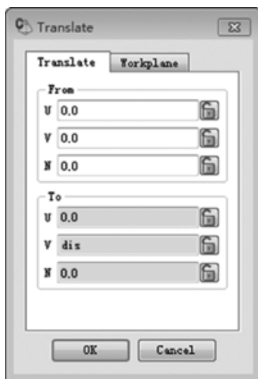


图 7-28　参数化（沿 V 轴平移 dis 距离）遮挡体沿锥台侧边的滑动距离

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，选择新建立的所有模型“ant1”“ant2”“Cone”“Cubiod”等，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“ant_with_ Cubiod_on_Cone”。

选中新生成的模型“ant_with_Cuboid_on_Cone”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simpify”选项，弹出“Simplify geometry”对话框，采用默认设置，直接单击“Create”按钮（遮挡体在锥台内部的部分会自动删除）。

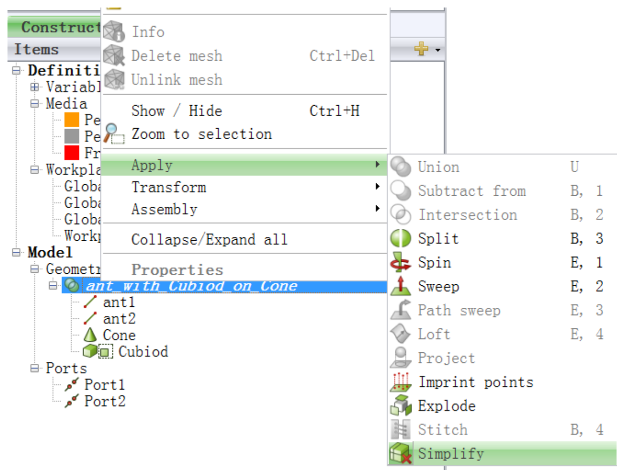


图 7-29 简化模型

（5）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，在弹出的“Solution frequency”对话框中设置如下。

选择：Linearly spaced discrete points。

Start frequency (Hz)：freq*0.8。

End frequency (Hz)：freq*1.2。

Number of frequencies：21。

单击“OK”按钮，如图 7-30 所示。

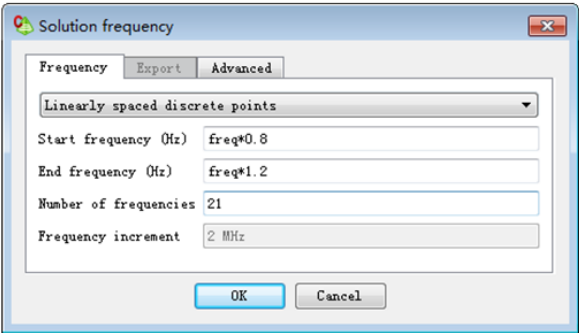


图 7-30 设置工作频率

求解设置：在“Configuration Specific”结点中，选中“Requests”，单击鼠标右键，选择“Multiport S-parameter”选项，弹出“Request S-parameters”对话框，按照图 7-31 所示进行设置，最后单击“Create”按钮。

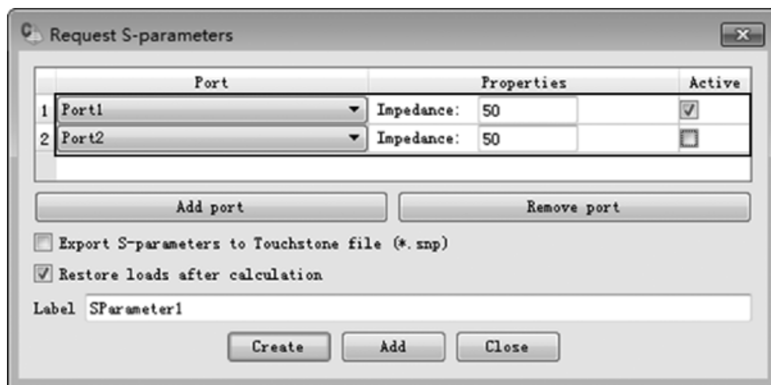


图 7-31　设置 S 参数计算

这时，在左侧的树形浏览器的上方的“Configurations”区域内新生成了一个“Sparameter Configuration1”。

激励加载：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击选中“Standard Configuration1”，进入“Configuration”选项卡中，展开“Global”结点，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Specify sources per configuration”选项，这时，“Source”结点会直接从“Global”结点中跳转到“Configuration specific”结点中。在“Configuration specific”结点中，选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置（“Port”默认为“Port1”），单击“Create”按钮完成设置，如图 7-32 所示。

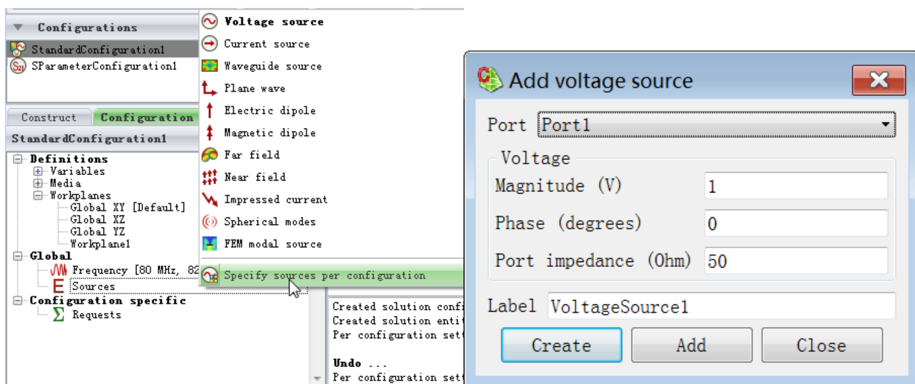


图 7-32　设置电压源为 1V，端口参考阻抗为 50Ohm

阻抗加载：在左侧的树形浏览器中，在“Configuration”选项卡中单击“Configuration settings”下拉组合框，选择“Loads per configuration”，再次选中“Configuration specific”结点，单击鼠标右键，选择“Add load”选项，弹出“Create load”对话框，进行如下设置。

Port：Port2。

Load type：Complex impedance。

Real part：50。

Label：Load2。

单击“Create”按钮，如图 7-33 所示。

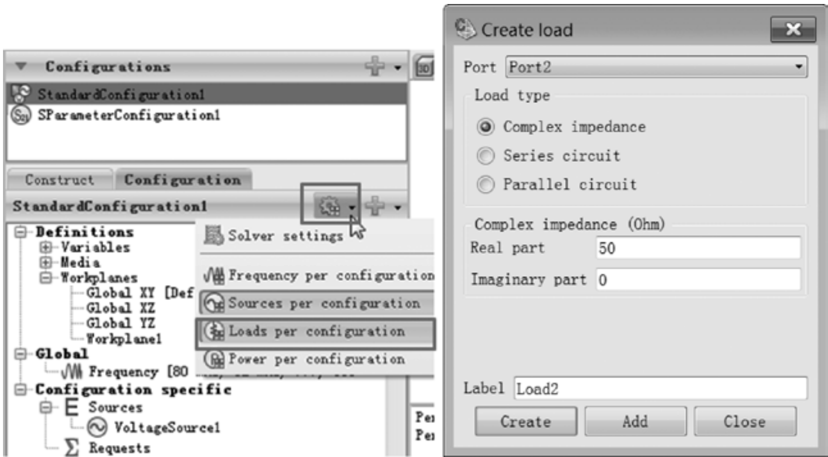


图 7-33　定义端口 2 的阻抗加载

功率加载：在左侧的树形浏览器中，在“Configuration”选项卡中，选中“Configuration specific”结点，单击鼠标右键，选择“Specify power per configuration”选项，再次选中“Configuration specific”结点，单击鼠标右键，选择“Power”选项，弹出“Power settings”对话框，进行如下设置。

选中：Incident power (transmission line model)。

Source power (Watt)：1。

Real part of Z0：50。

单击“OK”按钮，如图 7-34 所示。

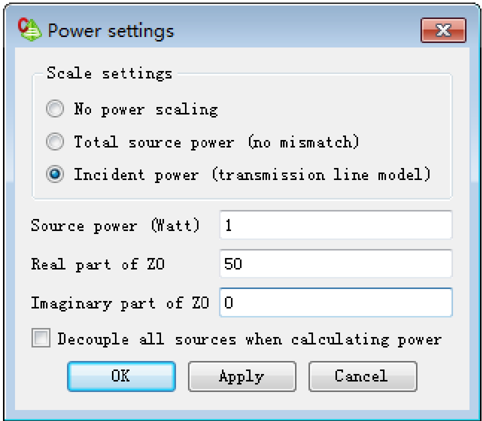


图 7-34　设定输入功率，考虑激励源端口的反射

（6）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Standard。

线段半径“Wire segment radius”：lam/90。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 7-35 所示。



图 7-35　定义网格划分

（7）提交计算

计算方法采用默认的矩量法“MoM”。

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（8）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 2D 结果，在“Home”菜单中单击“Cartesian”，生成直角坐标系“Cartesian Graph1”。在“Home”菜单中，单击“Scattering Matrix”按钮“”下的“SParameter1”，在右侧的控制面板中进行如下设置。

在“Traces”区域内选中“SParameter1”。

将“Fixed”中的“S-Parameter”设置为“S2,1”。

勾选“dB”复选框。

单击“Power”按钮“”下的“Load2”，在右侧的控制面板中进行如下设置。

在“Traces”区域内选中“Load2”。

勾选“dB”复选框。

保证“Traces”区域内的“Load2”处于选中状态，进入“Format”菜单，单击“Marker style”按钮“”下的“”，如图 7-36 所示。

两种计算方法得到的天线隔离度（S 参数法与功率法）曲线如图 7-36 所示，可以看出两种方法计算的结果完全一致。

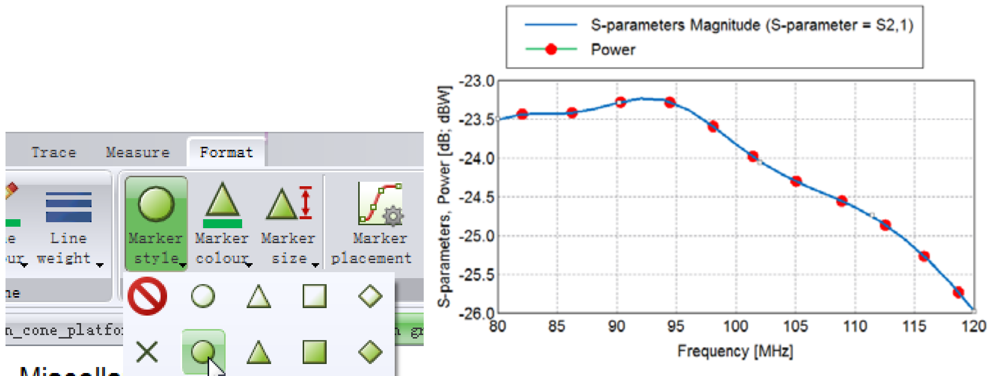


图 7-36　天线隔离度曲线（S 参数法对比功率法）

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“multi_ants_coupling_ on_cone_platform_s21.pfs”，关闭 POSTFEKO。

下面应用扫参法调整遮挡体的位置。

返回 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“multi_ants_coupling_on_cone_platform_s21.cfx”另存为“multi_ants_coupling_on_cone_platform_s21_opt.cfx”。

（1）修改求解设置

在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内选中“StandardConfiguration1”，删除该求解设置，只保留“SParameterConfiguration1”。

工作频率修正：在左侧的树形浏览器中，进入“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

（2）添加扫参优化设计

在左侧的树形浏览器中，选择“Construct”选项卡，进行如下设置。

单击右上角的“+”号，选择“Optimization”→“Add Search”选项，弹出“Add optimization search”对话框，进行如下设置。

Method type：Grid search。

单击“Create”按钮，如图 7-37 所示。

在左侧的树形浏览器中，自动添加了“Optimisation”结点，新定义的 Search1 自动生成，展开“Search1”结点，选中“Goals”结点，单击鼠标右键，选择“S-matrix goal”选项，弹出“Create S-parameter goal”对话框，进行如下设置。

Focus source label：SParameter1。

Quantity：Coupling coefficient(Smn)。

勾选：Specify input port number (n)，设置值为 1。

勾选：Specify output port number (m)，设置值为 2。

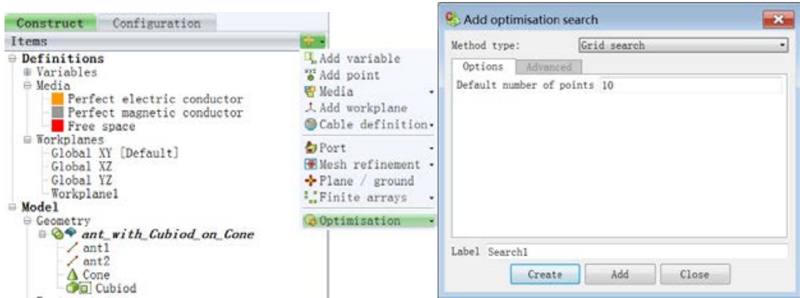


图 7-37　设置优化方法（扫参）

接着，按照表 7-1 所示设置优化目标函数。

表 7-1　设置优化目标函数

<table>
<tr><th>编　　号</th><th>Operation</th><th>Value</th></tr>
<tr><td>1</td><td>选择“Magnitude”</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">单击“Add”按钮</td></tr>
<tr><td>2</td><td>选择“Log”</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">单击“Add”按钮</td></tr>
<tr><td>3</td><td>选择“Scale”</td><td>20</td></tr>
</table>

Operator type：Greater than。

Goal objective：Single value。

Value：0.0。

Label：SParameterGoal1。

单击“Create”按钮，如图 7-38 所示。

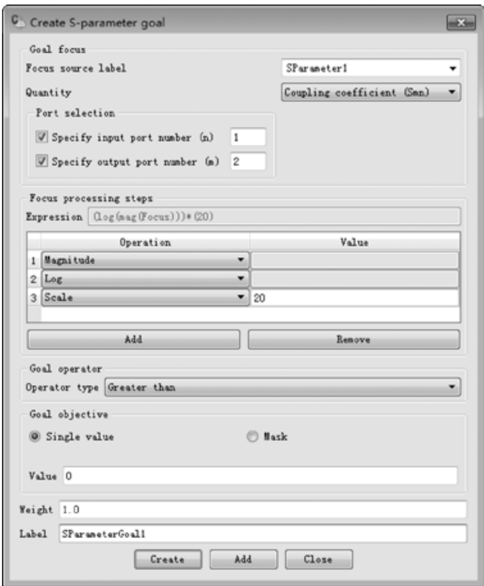


图 7-38　定义优化目标函数

在左侧的树形浏览器中的“Search1”结点中，双击“Parameters”结点，弹出“Optimisation parameters”对话框，进行如下设置。

Variable：dis。

Min value：0。

Max value：pos_start*2。

Start value：0。

Grid points：31。

单击“OK”按钮，如图 7-39 所示。

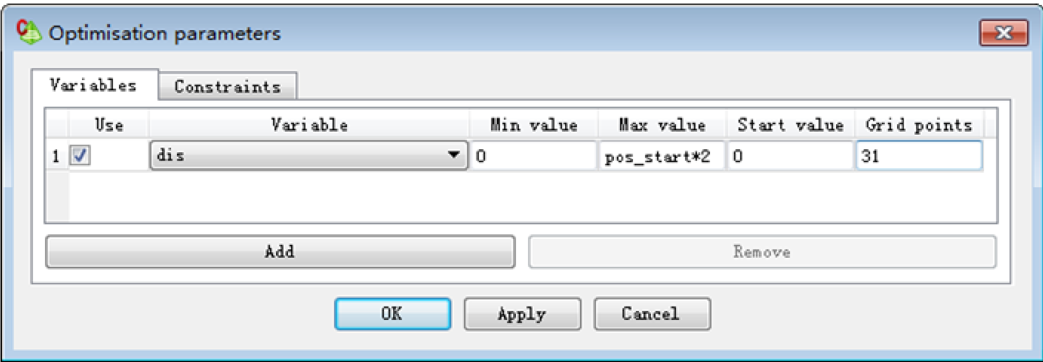


图 7-39　定义自变量参数

（3）网格生成

采用原有的网格即可。

（4）提交计算

计算方法采用默认的矩量法“MoM”。

进入“Solve/Run”菜单，单击“OptFEKO”按钮“ ”，或按〈Alt+6〉快捷键，提交计算。可以选择并行模式。

（5）后处理显示结果

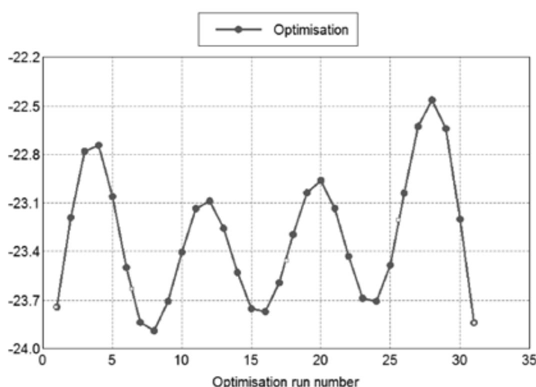
在计算的过程中，可以直接启动 POSTFEKO 显示优化的动态过程（目标函数的变化以及模型的变化）。在 3D 视图中，会直接显示载体模型（随着优化的进行，动态显示遮挡体在锥台上的滑动）。

在“Home”菜单，单击“Cartesian”，生成“Cartesian graphic1”，单击“ ”下拉按钮，选择“Optimisation”，在右侧的控制面板中进行如下设置。

在“Traces”区域内选中“Optimisation”。

在“Fixed”区域中，修正“Trace”为“search1.goals.sparametergoal1”，如图 7-40 所示。

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“multi_ants_coupling_on_ cone_platform_s21_opt.pfs”，关闭 POSTFEKO。



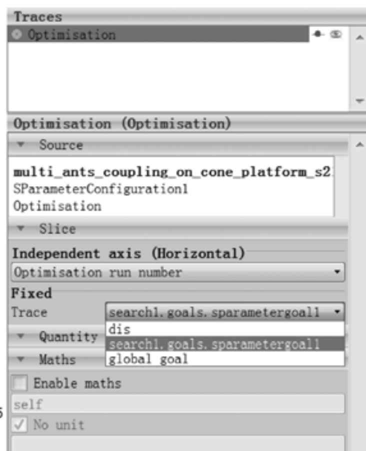


图 7-40　显示优化过程，纵坐标为隔离度，横坐标为遮挡体的位置编号 *n*

7.3　直升机天线布局仿真

直升机平台上 3 副单极子天线分别位于直升机的前、中、后 3 个位置，本节将分析天线安装在不同位置的方向图以及三副天线之间的互耦。计算方法采用多层快速多极子（MLFMM）。

启动 CADFEKO，新建工程文件，保存为“helicopter_antenna_placement.cfx”，单位采用默认的 m（米）。

（1）定义变量

在左侧的树形浏览器中，双击“Variables”结点，变量如下。

工作频率：freq=200e6。

波长：lam=c0/freq，如图 7-41 所示。

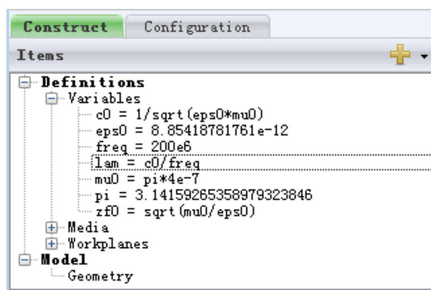


图 7-41　定义变量

（2）模型导入

通过几何模型接口导入“.../chapter07/app3/include/helicopter.x_t”文件，在“Home”菜单中，单击“Import”按钮下的“Geometry”，弹出“Import geometry”对话框，如图 7-42 所示，单击“Browse”按钮，读入模型“helicopter.x_t”，如图 7-43 所示。

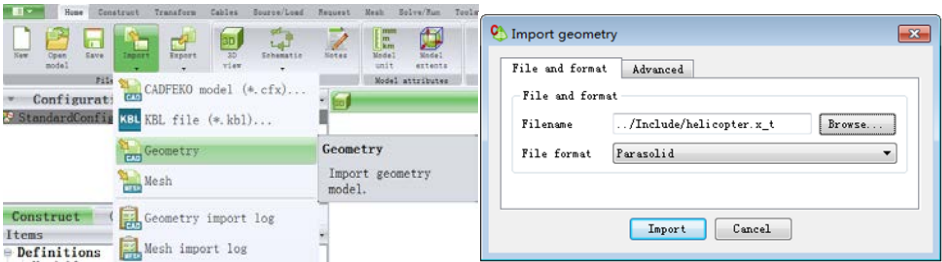


图 7-42　读入几何模型

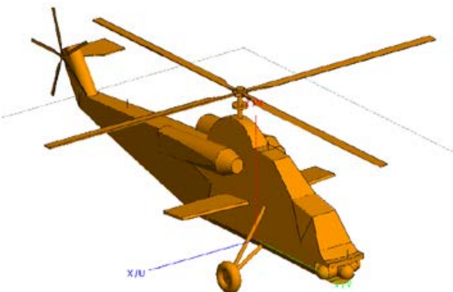


图 7-43　直升机几何模型

在左侧的树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，将“GeomImport1”名称修改为“Helicopter”，将“GeomImport2”名称修改为“front”，将“GeomImport3”名称修改为“back”，将“GeomImport4”名称修改为“mid”。选中所有模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项（或直接按〈U〉键），把新生成的模型更名为“Helicopter_antenna”，如图 7-44 所示。

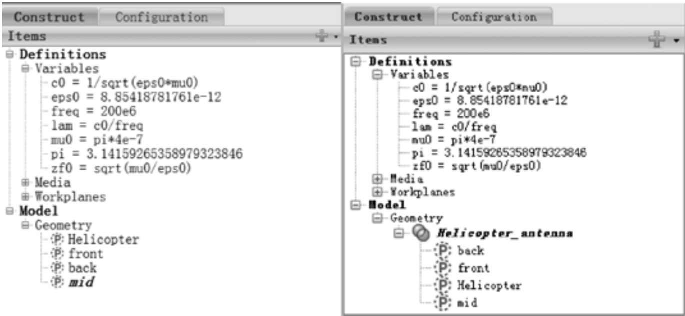


图 7-44　修改模型名称与模型布尔操作

（3）设定线端口和激励

在左侧的树形浏览器中，选中模型“Helicopter_antenna”，在其“Details”中，展开“Wires”结点，选择直升机前部天线的棱边编号“Wire406”，单击鼠标右键，选择“Greate port”→“Wire port”选项，弹出“Create wire port(geometry)”对话框，进行如下设置。

Location on wire：Start。

Label：front_ant_Port1。

单击“Add”按钮，如图 7-45 所示。

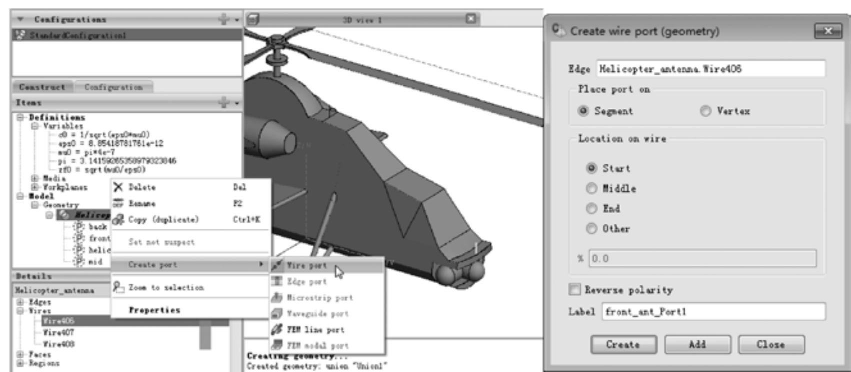


图 7-45　定义直升机前部天线端口 front_ant_port1

保持“Create wire port(geometry)”对话框打开，在“Details”中的“Wires”结点下选中直升机尾部天线的棱边编号“Wire407”，在“Create wire port(geometry)”对话框，中进行如下设置。

Edge 自动修正为：Helicopter_antenna.Wire407。

Label：back_ant_Port2。

单击“Create”按钮，如图 7-46 所示。

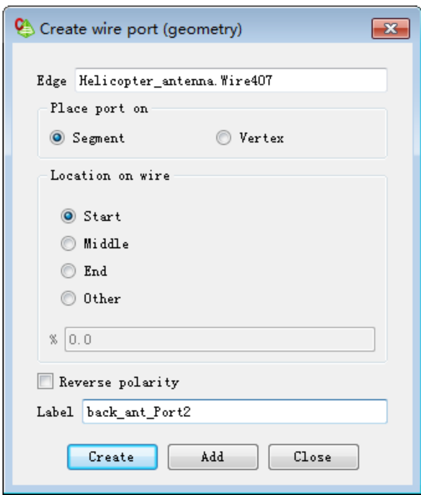


图 7-46　定义直升机尾部天线端口 back_ant_Port2

在左侧“Details”中的“Wires”结点下，选择直升机中部天线的棱边编号“Wire408”，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，弹出“Create wire port(geometry)”对话框，进行如下设置。

Location on wire：Start。

Label：mid_ant_Port3。

单击“Create”按钮，如图 7-47 所示。

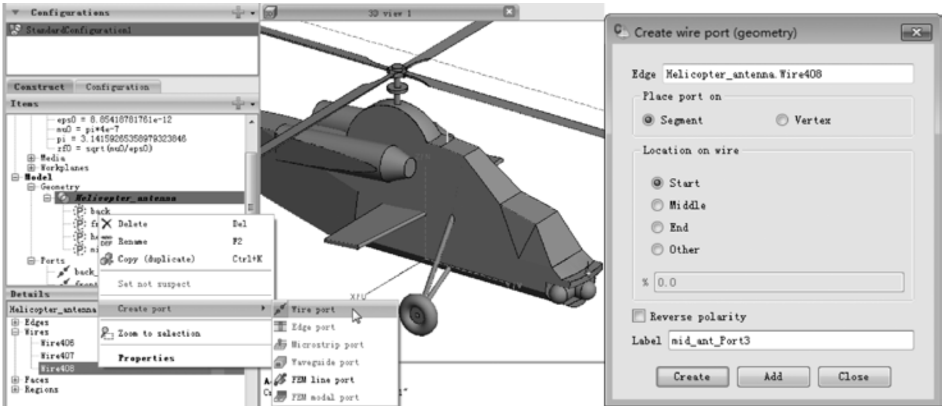


图 7-47　定义直升机中部天线端口 mid_ant_Port3

添加多个求解配置：进入“Request”菜单，单击“Standard configuration”按钮两次，添加两个标准求解配置，名称分别修改为 Front、Back、Mid，分别对应 3 副天线单独工作状态，如图 7-48 所示。

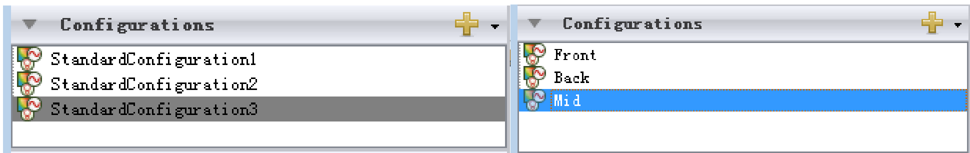


图 7-48　定义多求解配置

前部天线激励加载：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击选中“Front”，进入“Configuration”选项卡，选中“Configuration specific”结点，单击鼠标右键，选择“Specify sources per configuration”选项，“Sources”结点会移到“Configuration specific”结点中，选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，进行如下设置。

Port：front_ant_Port1。

Label：front_ant_VoltageSource1。

单击“Create”按钮，如图 7-49 所示。

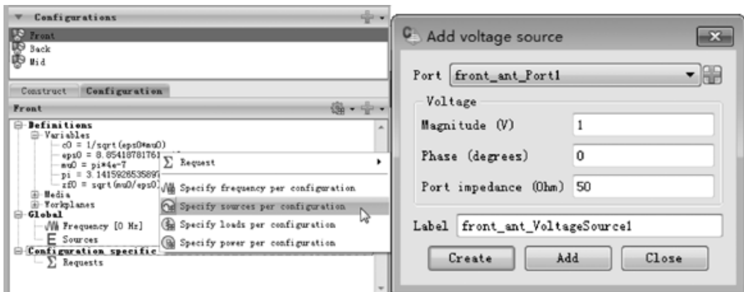


图 7-49　设置前部天线电压源为 1V，端口参考阻抗为 50Ohm

尾部天线激励加载：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击选中“Back”，在“Configuration”选项卡中，展开“Configuration specific”结点，选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框。

Port：back_ant_Port2。

Label：back_ant_VoltageSource2。

单击“Create”按钮，如图 7-50 所示。

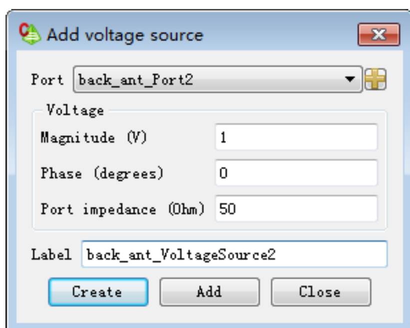


图 7-50　设置尾部天线电压源为 1V，端口参考阻抗为 50Ohm

中部天线激励加载：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击选中“Mid”，在“Configuration”选项卡，展开“Configuration specific”结点，选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框。

Port：mid_ant_Port3。

Label：mid_ant_VoltageSource3。

单击“Create”按钮，如图 7-51 所示。

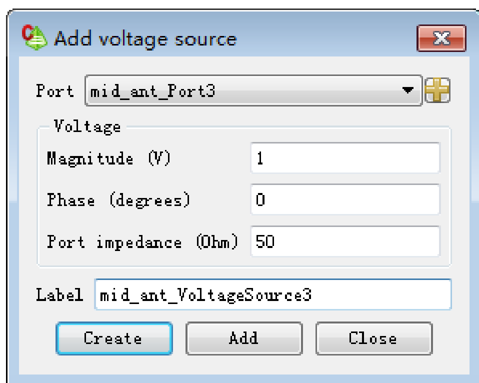


图 7-51　设置机身中部天线电压源为 1V，端口参考阻抗为 50Ohm

（4）设置计算方法

进入“Solve/Run” 菜单，单击“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，选择“MLFMM/ACA”选项卡，进行如下设置。

勾中：Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)。

单击“OK”按钮，如图 7-52 所示。

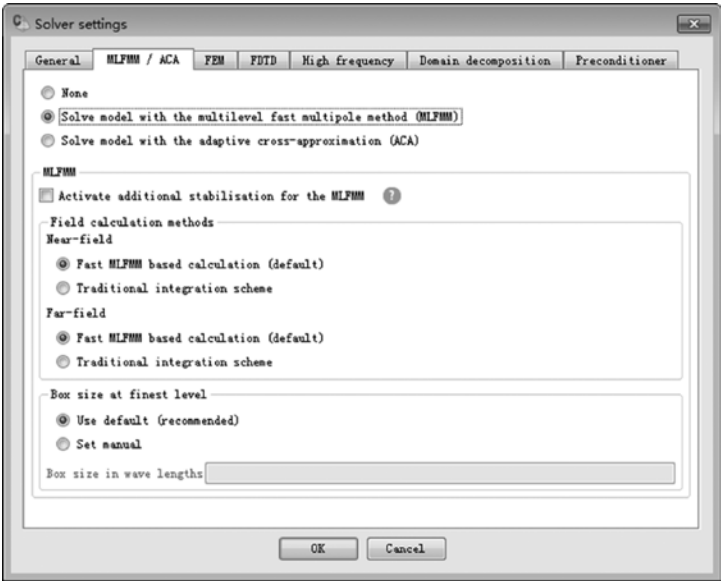


图 7-52　设置计算方法为 MLFMM

（5）设置频率

在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮，如图 7-53 所示。

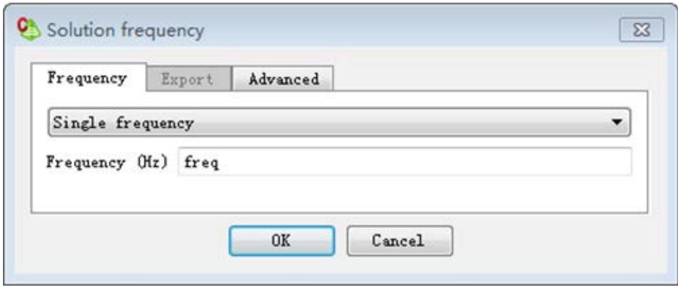


图 7-53　设置工作频率

（6）求解设置

求解设置：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击选中“Front”，在“Configuration”选项卡中展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

在“Position”选项卡中：

单击“3D pattern”按钮。

theta 的 Increment：2。

Phi 的 Increment：5.0。

Label：Front_3D。

切换到“Workplane”选项卡中：

将光标定位在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉键，在 3D 视图中选中“Front”天线与直升机交点的位置，保证 U 轴平行于 X 轴，V 轴平行于 Y 轴，拾取完成后，设置如下。

Origin：（X：0,Y：5.8610440834,Z：1.1）。

U vector：(X：1, Y：0, Z：0)。

V vector：(X：0, Y：1, Z：0)。

单击“Create”按钮，如图 7-54 和图 7-55 所示。

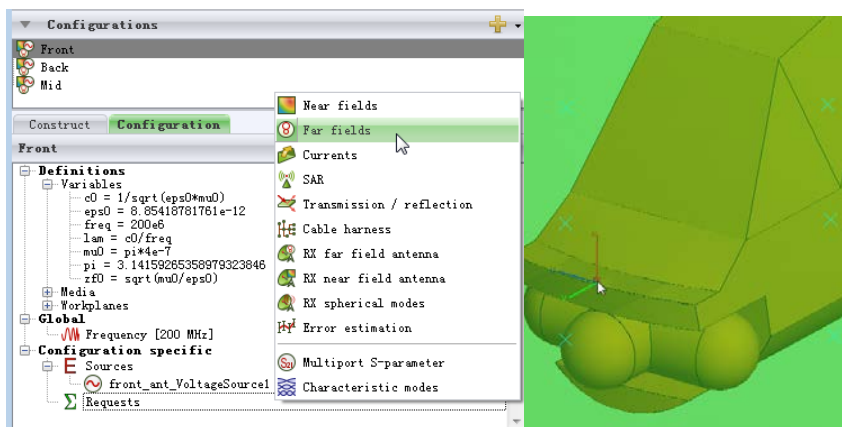


图 7-54　前部远场方向图求解设置（3D pattern）

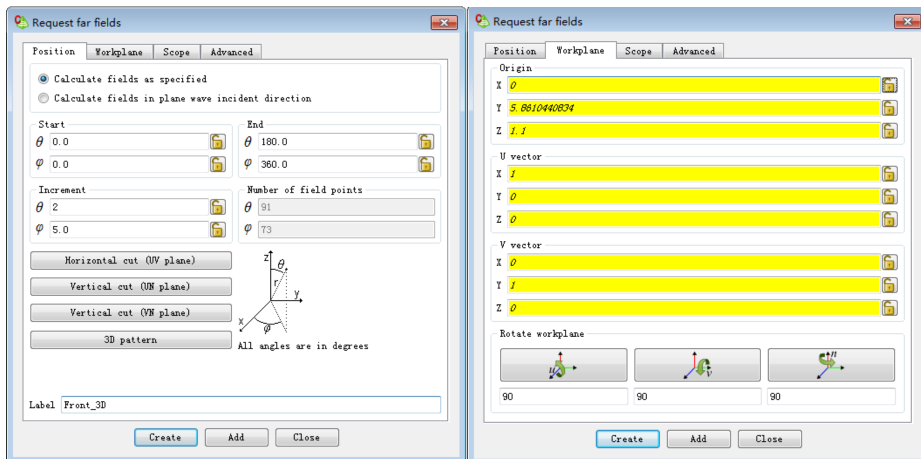


图 7-55　添加机身前部天线 3D 方向图“Front_3D”

设置尾部天线方向图：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击选中“Back”，在“Configuration”选项卡中展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”

结点，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

在“Position”选项卡中：

单击“3D pattern”按钮。

theta 的 Increment：2。

Phi 的 Increment：5.0。

Label：Back_3D。

切换到“Workplane”选项卡中：

将光标定位在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在 3D 视图中选中“Back”天线与直升机交点的位置，保证 U 轴平行于 X 轴，V 轴平行于 Y 轴，拾取完成后，设置如下。

Origin：（X：−0.0016242583,Y：−8.2227625053,Z：2.8226580328）。

U vector：(X：1, Y：0, Z：0)。

V vector：(X：0, Y：1, Z：0)。

单击“Create”按钮，如图 7-56 和图 7-57 所示。

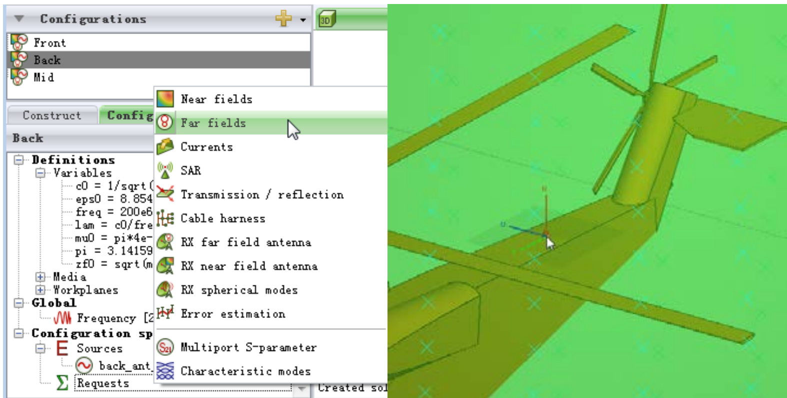


图 7-56　尾部远场方向图求解设置（3D pattern）

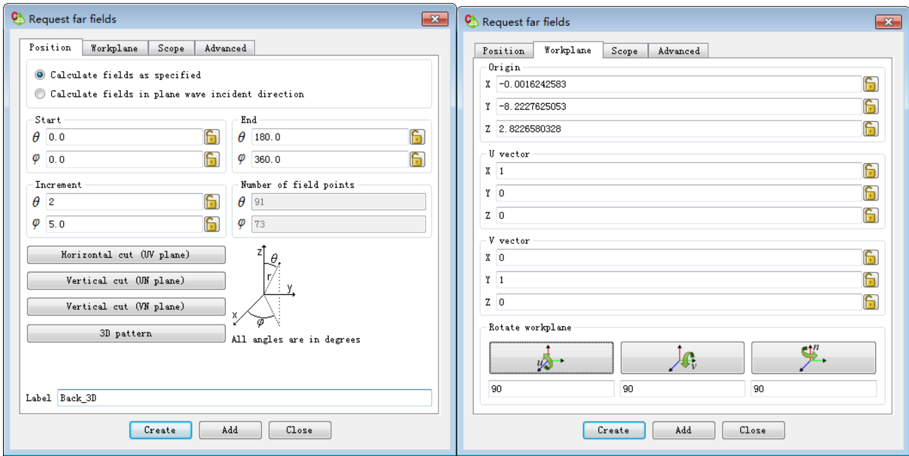


图 7-57　添加机身尾部天线 3D 方向图“Back_3D”

设置机身中部天线方向图：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击选中“Mid”，在“Configuration”选项卡中展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

在“Position”选项卡中：

单击“3D pattern”按钮。

theta 的 Increment：2。

Phi 的 Increment：5.0。

Label：Mid_3D。

切换到“Workplane”选项卡：

将光标定位在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在 3D 视图中选中“Mid”天线与直升机交点的位置，保证 U 轴平行于 X 轴，V 轴平行于 Y 轴，拾取完成后，设置如下。

Origin：（X：0,Y：0.8132486541,Z：4）。

U vector：(X：1, Y：0, Z：0)。

V vector：(X：0, Y：1, Z：0)。

单击“Create”按钮，如图 7-58 和图 7-59 所示。

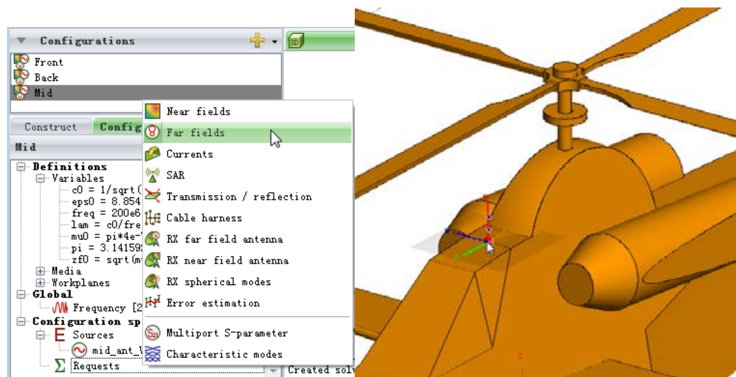


图 7-58　中部远场方向图求解设置（3D pattern）

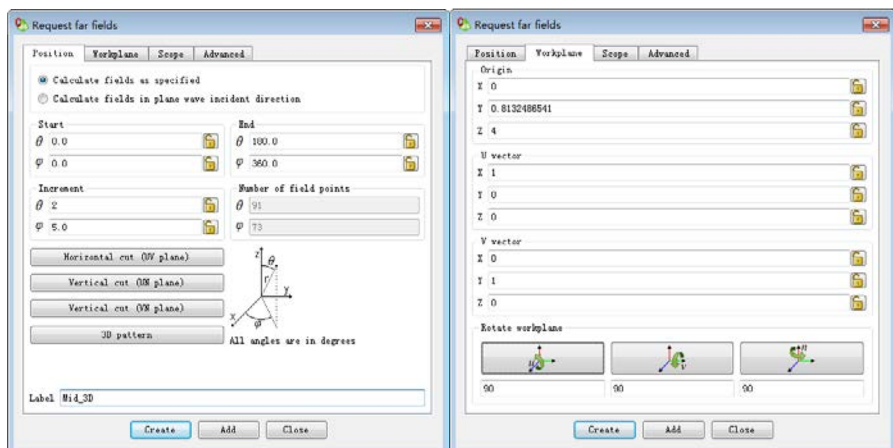


图 7-59　添加机身中部天线 3D 方向图“Mid_3D”

（7）网格划分

进入“Mesh”菜单，单击“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Coarse。

Wire segment radius：1e−3。

单击“Mesh”按钮，如图 7-60 所示。

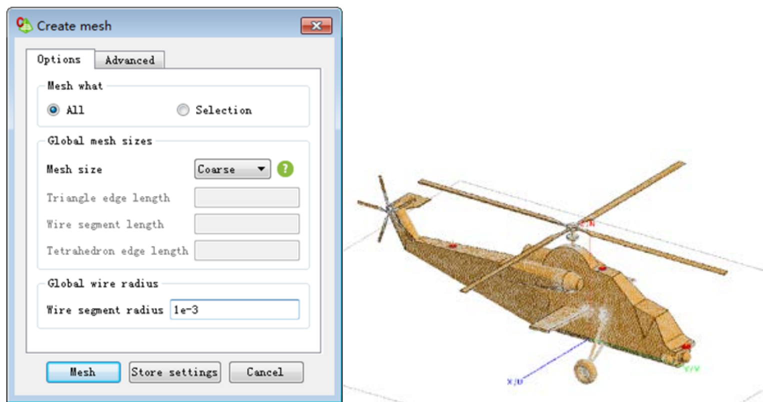


图 7-60　定义网格划分（左）与直升机网格模型（右）

（8）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（9）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中单击“Far field”按钮下的“Front_3D”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。

进入“Result”菜单，单击“Grid”按钮。

进入“Display”菜单，单击“Legends”区域右下角的“ ”按钮，弹出“3D view legend range settings”对话框，不勾选“Round off legend range and step size”复选框，单击“OK”按钮关闭对话框。机身前部天线 3D 方向图如图 7-61 所示。

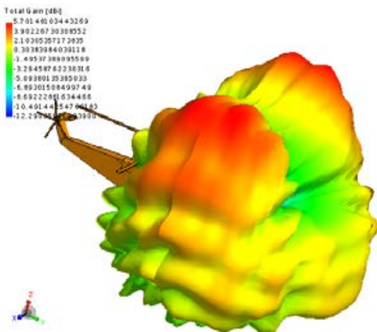


图 7-61　机身前部天线 3D 方向图（Front_3D）

在“Home”菜单中单击“3D view”按钮下的“Back”，新建尾部天线 3D 视图，单击“Far field”按钮下的“Back_3D”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。

进入“Result”菜单，单击“Grid”按钮，在“Size”按钮下选择 20%。

进入“Display”菜单，单击“Legends”区域右下角的“ ”按钮，弹出“3D view legend range settings”对话框，不勾选“Round off legend range and step size”复选框，单击“OK”按钮关闭对话框。机身尾部天线 3D 方向图 7-62 所示。

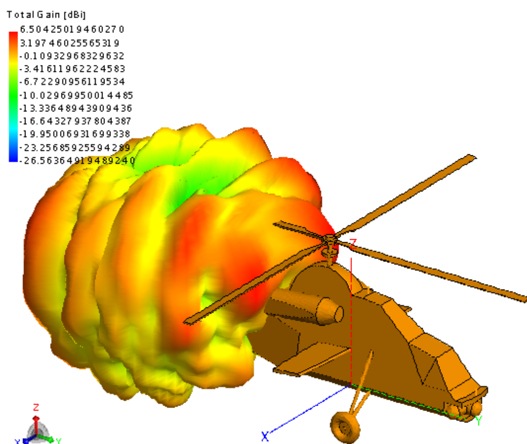


图 7-62　机身尾部天线 3D 方向图（Back_3D）

在“Home”菜单中单击“3D view”按钮下的“Mid”，新建尾部天线 3D 视图，单击“Far field”按钮下的“Mid_3D”，在右侧的控制面板中，勾选“dB”复选框。

进入“Result”菜单，单击“Grid”按钮，在“Size”按钮下选择 20%。

进入“Display”菜单，单击“Legends”区域右下角的“ ”按钮，弹出“3D view legend range settings”对话框，不勾选“Round off legend range and step size”复选框，单击“OK”按钮关闭对话框。机身中部天线 3D 方向图如图 7-63 所示。

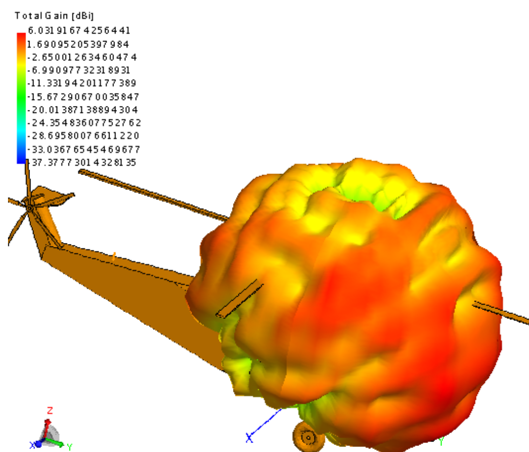


图 7-63　机身中部天线 3D 方向图（Mid_3D）

显示 2D 结果：在“Home”菜单，单击“Polar”，进入极坐标系“Polar Graph1”，单击“Far field”按钮，然后依次单击“Front _3D”“Back_3D”和“Mid_3D”，极坐标图中即显示不同安装位置的方向图。在右侧的控制面板中的“Traces”区域内，选中所有的 Trace：Front_3D、Back_3D 和 Mid_3D，在控制面板中进行设置。

Independent axis(Angular)：Phi。

Theta：90 deg。

勾选：dB。

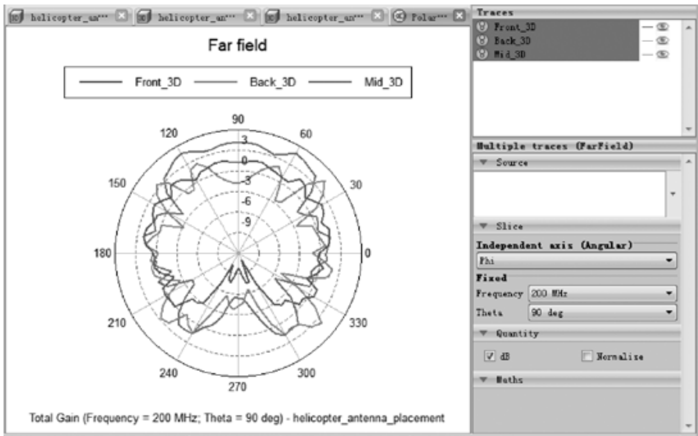


图 7-64　直升机天线不同安装位置的水平面方向图

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为 “helicopter_antenna_ placement.pfs”，关闭 POSTFEKO。

上例仿真分析了天线安装在直升机平台不同位置的方向图，评估最佳的天线安装位置。下面将分析不同位置天线之间的隔离度，在 CADFEKO 将上一个工程文件另存为“helicopter_antenna_coupling.cfx”。

（1）多端口 S 参数设置

在树形浏览器上方的“Configurations”区域内，单击右上角的“ ”按钮，选择“Multiport S-parameter”选项，如图 7-65 所示，弹出“Request S-parameters”对话框，进行如下设置。

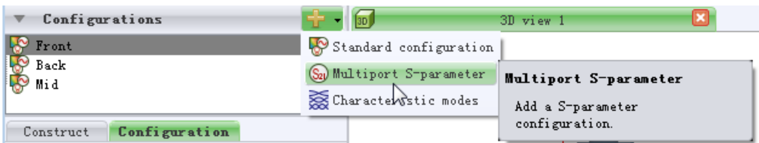


图 7-65　添加多端口 S 参数求解

单击两次“Add port”按钮。

Port 列：从上到下依次选择 front_ant_Port1、back_ant_Port2、mid_ant_Port3。

Active 列：只勾选第 1 行的复选框。

单击“Create”按钮，如图 7-66 所示。

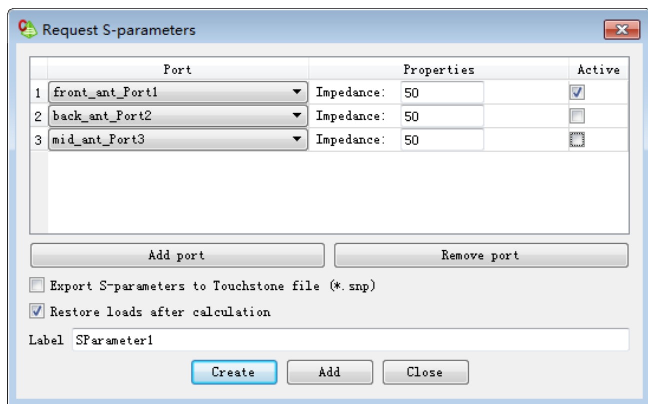


图 7-66　定义多端口 S 参数

在“Configurations”区域内，依次选中 Front、Back、Mid，单击鼠标右键，选择“Delete”选项后，该区域只包含“SParameterConfiguration1”。

电参数设置：在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Linearly spaced discrete points。

Start frequency (Hz)：180e6。

End frequency (Hz)：200e6。

Number of frequencies：11。

单击“OK”按钮，如图 7-67 所示。

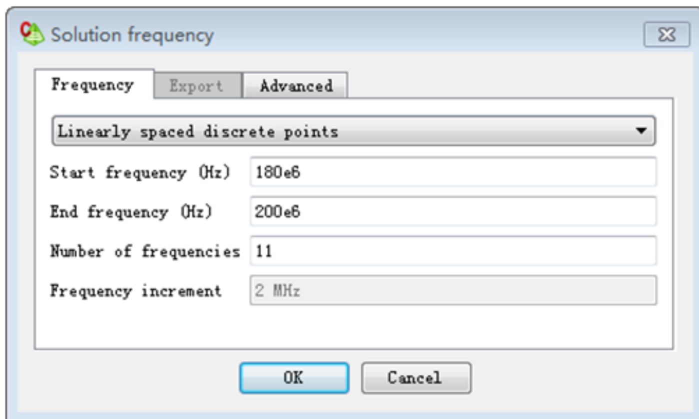


图 7-67　设置扫频计算

设置混合场积分方程（CFIE），加快仿真模型计算收敛性，该直升机模型为封闭金属结构（法向已经统一朝外），因此可以设置为混合场积分方程求解。

检查模型法向朝外，在“Display options”菜单中，单击“Colour”→“Element

Normal”。观察面的颜色确认模型的法向，绿色表示面元法向朝外侧，褐色表示法向朝内侧。检查显示如图 7-68 所示，直升机表面为绿色，表示所有直升机的面元均满足法向朝外。

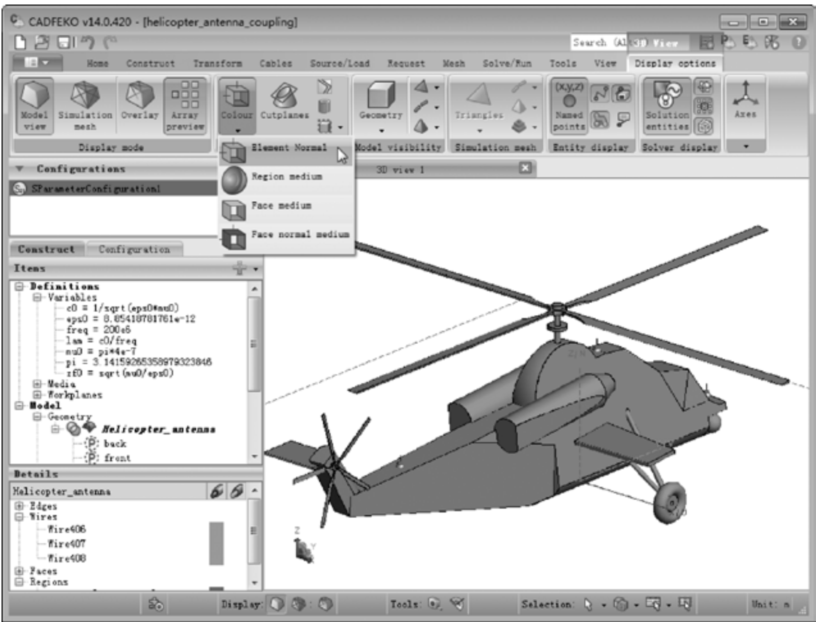


图 7-68　直升机模型表面呈现绿色表示法向朝外

在左侧的树形浏览器中的“Construct”选项卡中，展开“Model”→“Geometry”结点，选中模型“Helicopter_antenna”，在下方的“Details”中，展开“Faces”结点，选中直升机全部面元，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，选择“Solution”选项卡，在“Integral equation”下拉列表框中，选择“Combined field”选项，单击“OK”按钮，如图 7-69 所示。

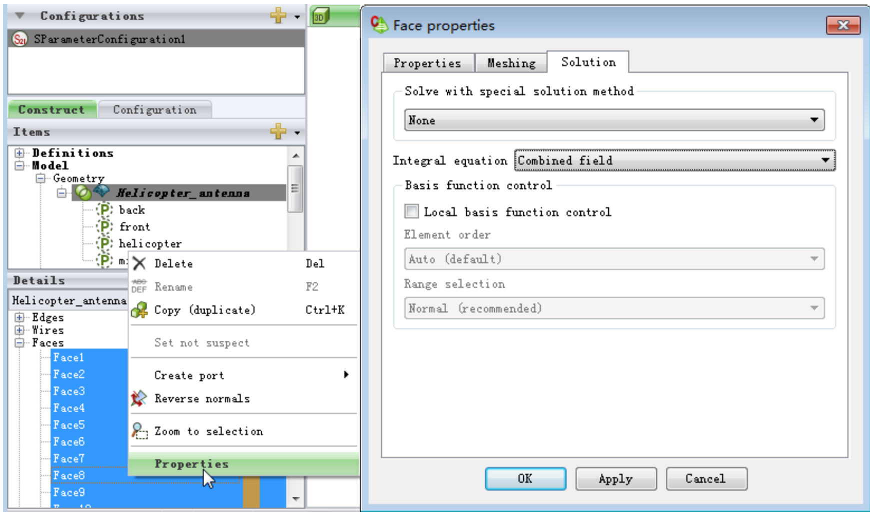


图 7-69　选择直升机全部表面并设置为混合场积分方程

（2）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Coarse。

Wire segment radius：1e−3。

单击“Mesh”按钮生成网格。

（3）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（4）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 2D 结果：在“Home”菜单，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian Graph1”，进行如下设置。

单击“Scattering Matrix”按钮“ ”下的“SParameter1”，在右侧的控制面板中，进行如下设置。

在“Traces”区域内选中“SParameter1”。

在“Fixed”区域内的“S-parameter ”下拉列表框中选择“S2,1”。

勾选“dB”复选框。

单击“Scattering Matrix”按钮“ ”下的“SParameter1”，在右侧的控制面板中，进行如下设置。

在“Traces”区域内选中“SParameter1_1”。

在“Fixed”区域内的“S-parameter”下拉列表框中选择“S3,1”。

勾选“dB”复选框，如图 7-70 所示。

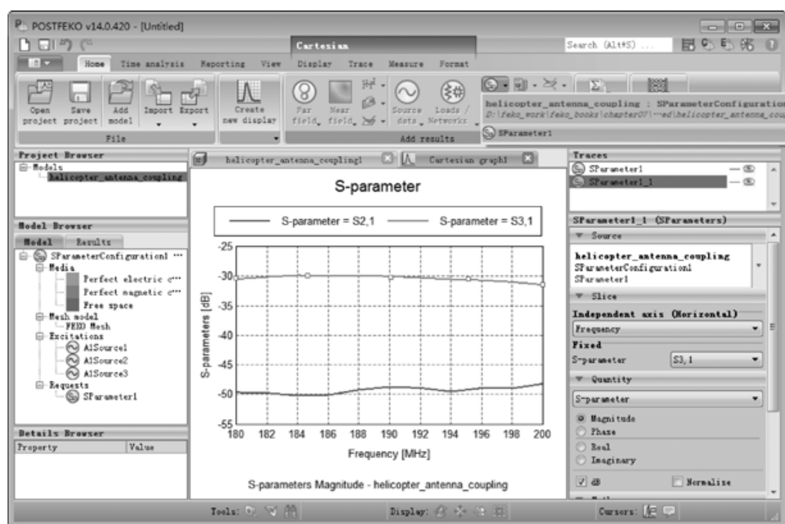


图 7-70　直升机平台天线隔离度曲线“S2,1”与“S3,1”参数

仿真结果显示天线 1 与天线 2 之间耦合度低于−45dB，天线 1 和天线 3 之间的耦合度接近−30dB。

7.4 车内天线布局

汽车已是机电一体化、智能化和信息化的高科技集成产品，射频技术已经深入到整车的每一个子系统中，如智能钥匙系统、胎压检测系统、3G/4G 移动通信系统、GPS 导航系统等。以上设备的天线均会受到车体的影响，尤其是安装在车内部的天线，车体的遮挡更加显著。对于典型的汽车遥控钥匙（RKE）系统，车身控制器（BCM）安装在车内不同位置，车身控制器（BCM）与遥控钥匙（RKE）的有效作用距离与 BCM 控制器在车内的放置位置和接收天线增益、遥控钥匙发射功率和发射天线增益、车辆车身结构损耗以及遥控钥匙到车身控制器模块的距离等因素有关，工作原理如图 7-71 所示，BCM 的安装位置将影响遥控效果。电磁仿真可以在设计初期优化射频天线的安装位置。

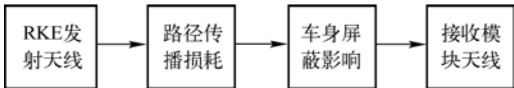


图 7-71 遥控钥匙通信链路

启动 CADFEKO，新建工程文件，保存为“BCM_Car.cfx”，单位采用默认的 m（米）。

（1）定义变量

在左侧的树形浏览器中，双击“Variables”结点，定义如下变量。

工作频率 freq=433.92e6。

波长：lam=c0/freq，如图 7-72 所示。

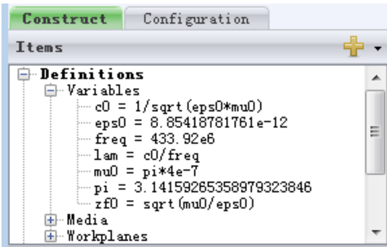


图 7-72 定义变量

（2）模型导入

几何单位采用默认的 m（米）。通过几何模型导入接口，导入“.../chapter07/Include/BCM_with_car.x_t”文件，如图 7-73 所示。

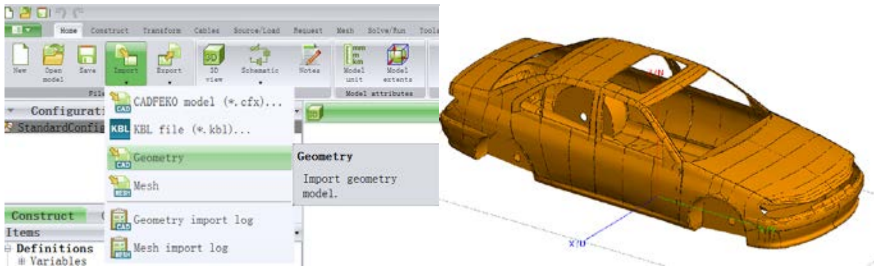


图 7-73 读入几何模型

在左侧的树形浏览器中，依次展开“Model”→“Geometry”结点，将导入的 GeomImport1 名称修改为“Car”，同时选中导入的模型“GeomImport2”和“GeomImport3”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项（或直接按〈U〉键），把新生成的模型更名为“BCM”，如图 7-74 所示。

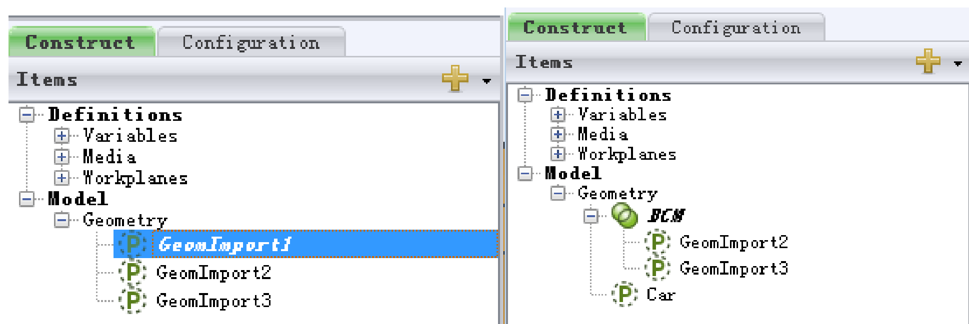


图 7-74　修改模型名称

选中 BCM 模型并单击鼠标右键，选择“Transform”→“Rotate”选项，弹出“Rotate”对话框，进行如下设置。

Origin：（U：0, V：0, N：0）。

Axis direction：（U：1, V：0, N：0）。

Rotation angle：90，如图 7-75 所示。

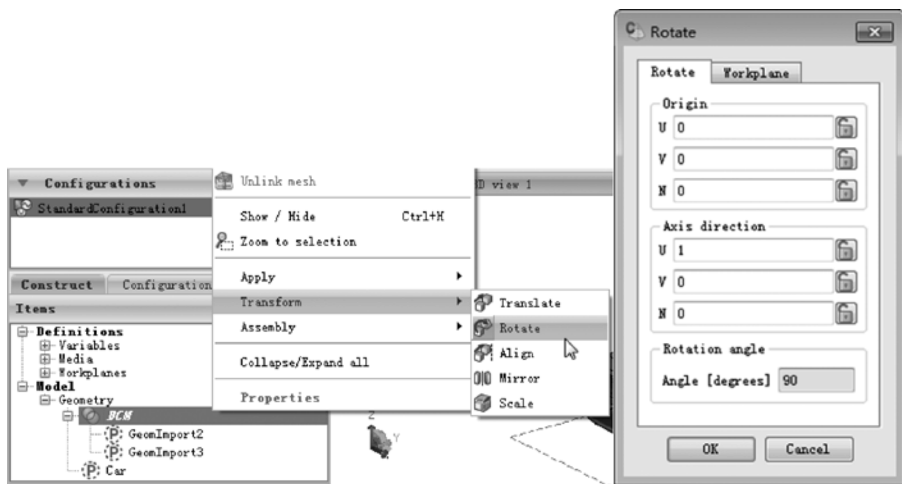


图 7-75　BCM 模型旋转

定义 BCM 的安装位置坐标：在左侧的树形浏览器的“Construct”选项卡中，选中“Definitions”结点并单击鼠标右键，选择“Add point”选项，弹出“Create named point”对话框，进行如下设置。

Name：POS。

Point：（X：−0.48, Y：0.7, Z：0.7），如图 7-76 所示。

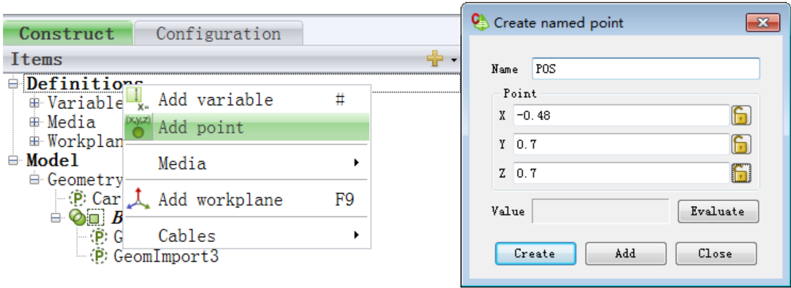


图 7-76 定义 BCM 的安装位置

选中 BCM 模型并单击鼠标右键，选择“Transform”→“Translate”选项，弹出“Translate”对话框，进行如下设置。

From：(U：0, V：0, N：0)。

To：(U：POS, V：POS, N：POS)，如图 7-77 所示。

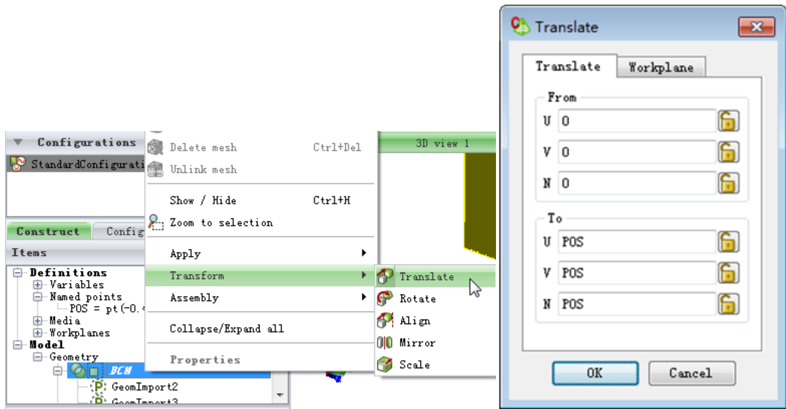


图 7-77 平移 BCM 模型

（3）定义介质材料

在左侧的树形浏览器的“Construct”选项卡下，选中“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric medium”选项，如图 7-78 所示，弹出“Create dielectric medium”对话框，创建 BCM 介质基板：FR4 材料，具体设置如下。

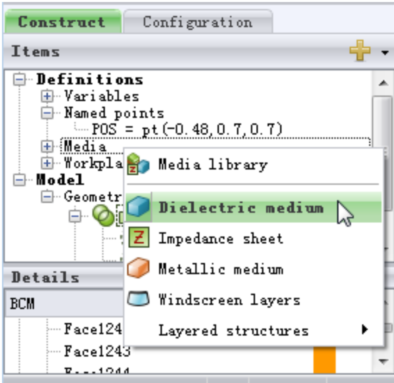


图 7-78 创建 FR4 材料

Relative permittivity（ε_r）：4.8。

Dielectric loss tangent (tanδ)：0.017。

Label：FR4。

单击“Create”按钮，如图 7-79 所示。

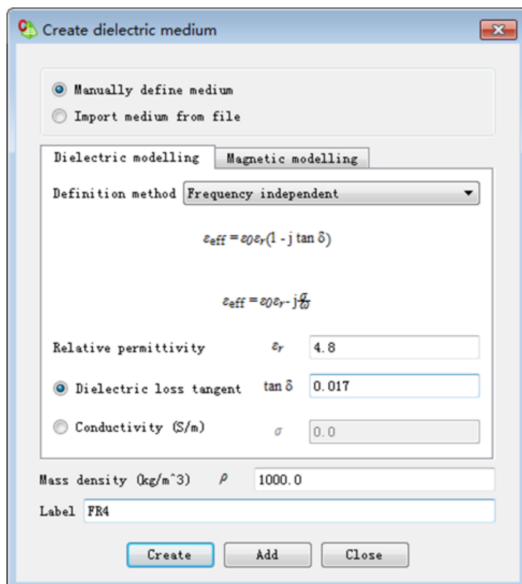


图 7-79　定义 BCM 基板 FR4 材料

选中车身模型“Car”，单击鼠标右键，选择“Show/Hide”选项，隐藏车身模型，如图 7-80 所示。

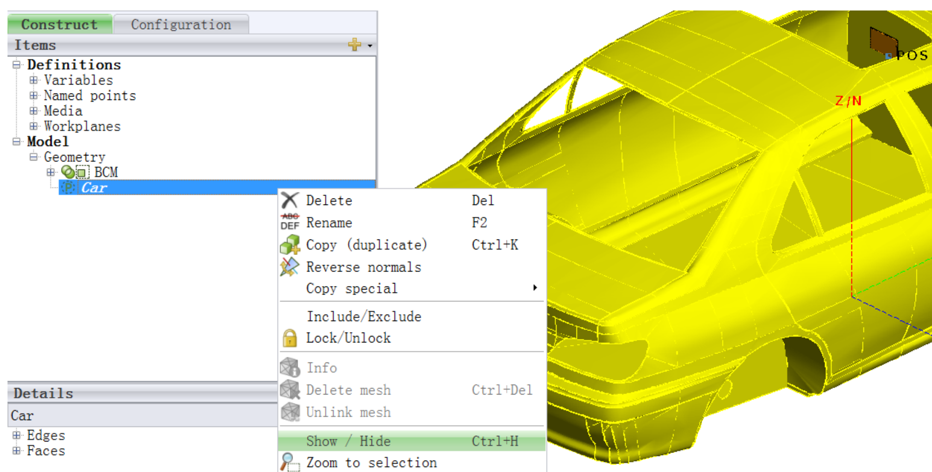


图 7-80　隐藏车身模型

选中几何模型“BCM”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选中 Region1，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行

如下设置。

Medium：FR4。

单击“OK”按钮，如图 7-81 所示。

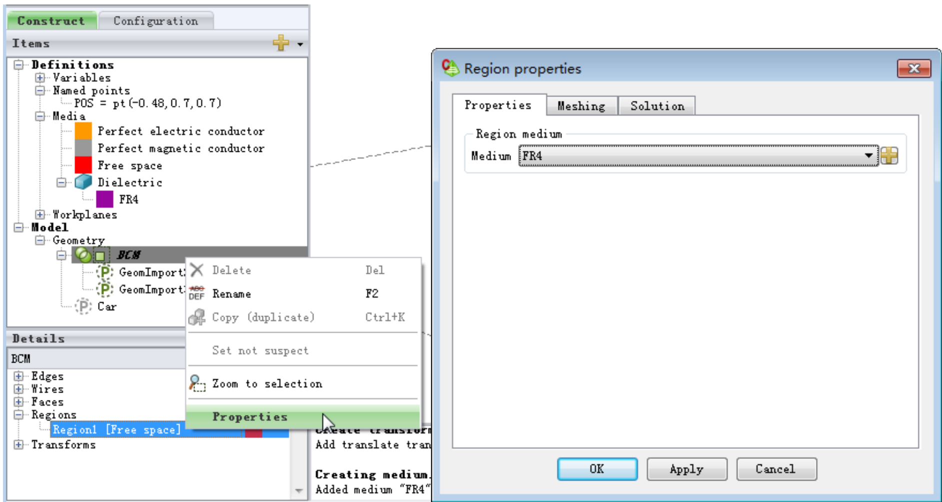


图 7-81　修改 BCM 模型 Region1 区域的材料为 FR4

设置面选择模式：进入“Tools”菜单，单击“Selection type”按钮下的“Faces”，修改面选择模式，如图 7-82 所示。

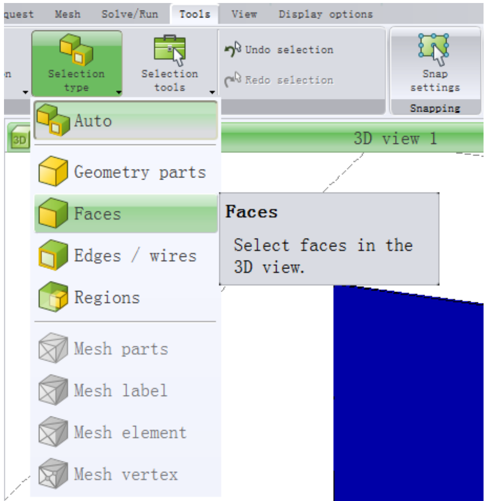


图 7-82　修改面选择模式

修改天线与金属底板的材料属性：在 3D 视图中选择图 7-83 所示的 3 个面元（对应“Details”中“Faces”结点下的“Face1242”“Face1243”和“Face1249”，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进行如下设置。

Medium：Perfect electric conductor。

单击“OK”按钮，如图 7-84 所示。

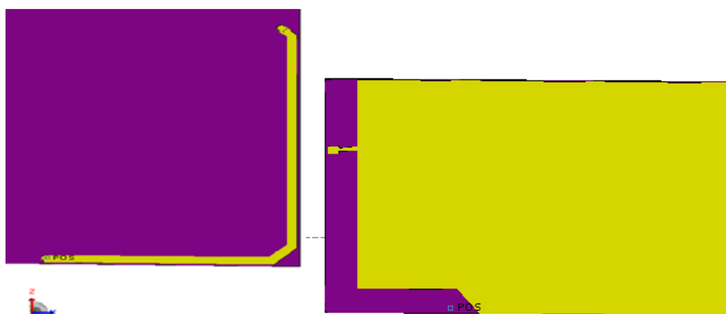


图 7-83　选择 L 形天线、天线端部金属圆孔和底板的面

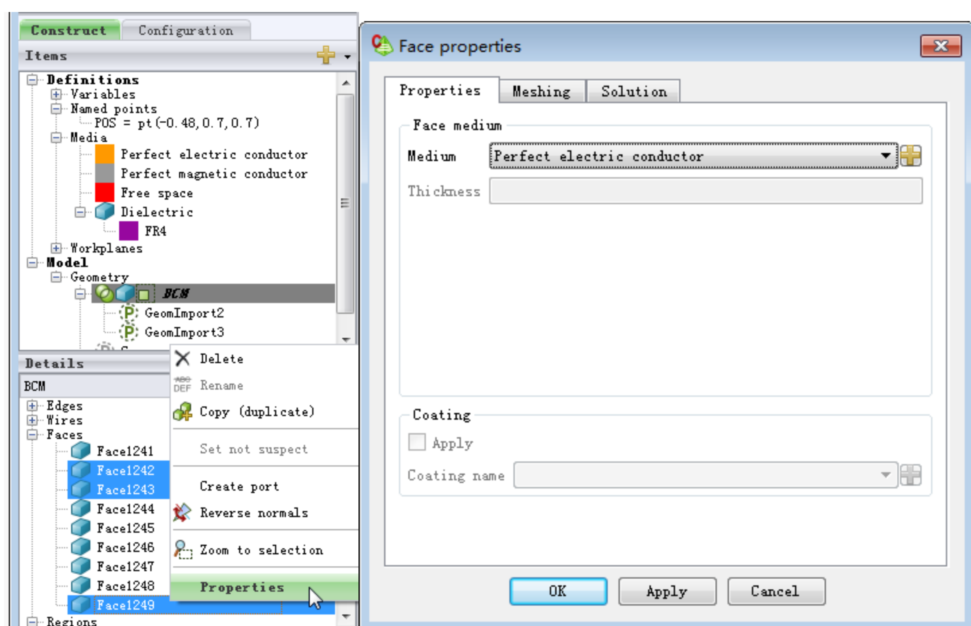


图 7-84　修改天线和底板面为理想金属

（4）设定线端口和激励

在左侧的树形浏览器中，选中模型“BCM”，在其“Details”中，展开“Wires”结点，选择“Wire1529”，单击鼠标右键，选择“Create Port”→“Wire port”选项，弹出“Create wire port（geometry）”对话框，进行如下设置。

Location on wire：Middle。

Label：Port1。

单击“Create”按钮，如图 7-85 所示。

激励加载：在左侧的树形浏览器中，进入“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，选中“Sources”，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮完成设置，如图 7-86 所示。

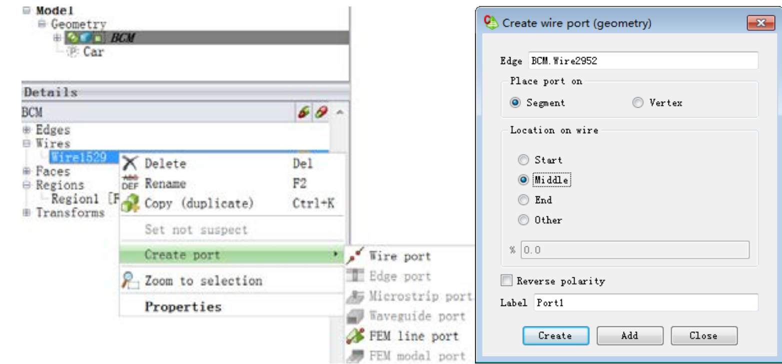


图 7-85　定义线端口 Port1

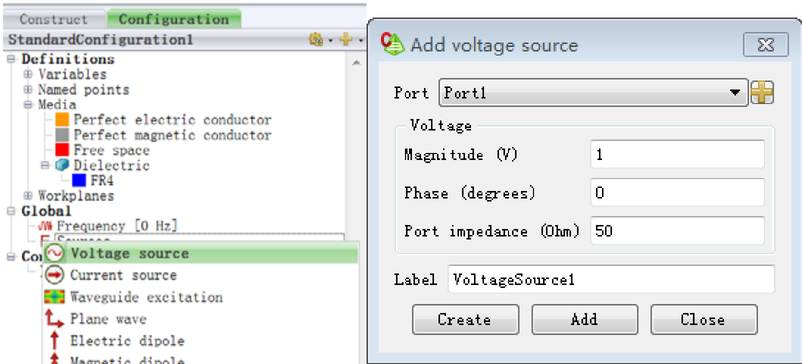


图 7-86　设置电压源为 1V，端口参考阻抗为 50Ohm

（5）设置计算方法

进入“Solve/Run”菜单，单击“Solver Settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，选择“MLFMM/ACA”选项卡，进行如下设置。

勾中：Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)。

单击“OK”按钮，如图 7-87 所示。

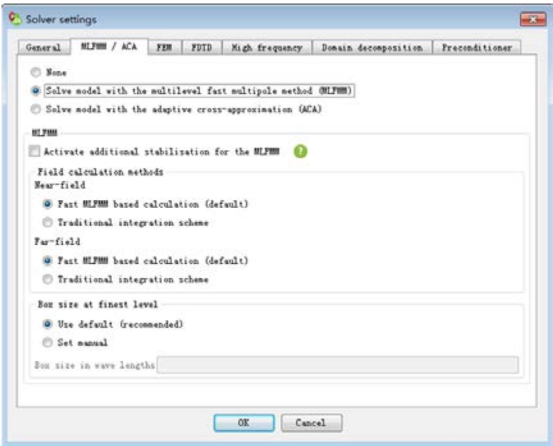


图 7-87　设置计算方法为 MLFMM

（6）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，保持选择“Configuration”选项卡中，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

求解设置：展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮。

Theta 的 Increment：1。

Phi 的 Increment：2。

Label：ff_3D。

单击“Create”按钮，如图 7-88 所示。

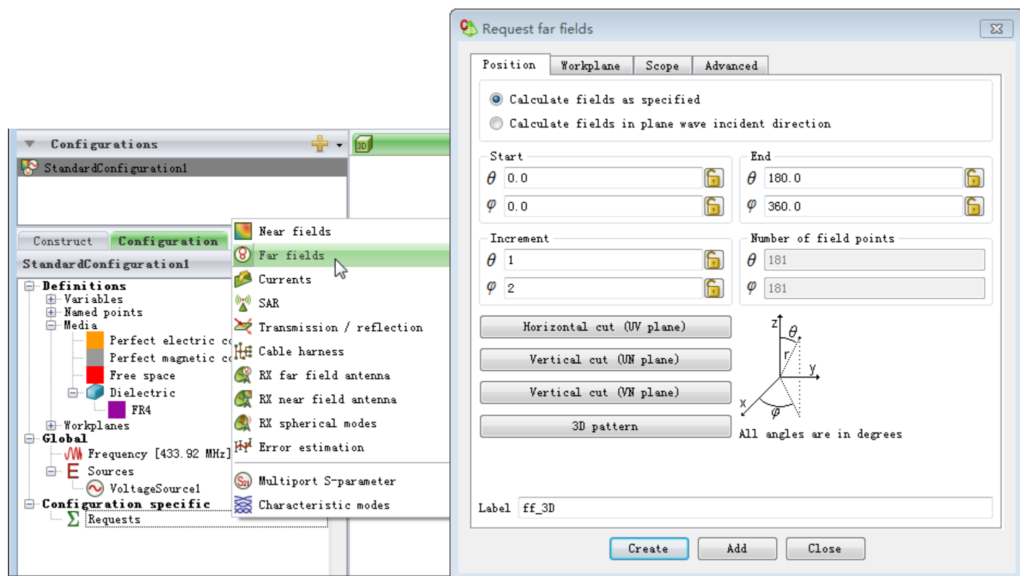


图 7-88 远场方向图求解设置（3D pattern）

添加近场：在“Configuration specific”结点，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Near fields”选项，弹出“Request near fields”对话框，进行如下设置。

Definition methods：Cylindrical。

选择：Specify increments。

Start：(ρ：3,φ：0.0, Z：1)。

End ：(ρ：30, φ：360, Z：1)。

Increment：(ρ：1, φ：2,Z：0)。

Label：NF_Z_1m，如图 7-89 所示。

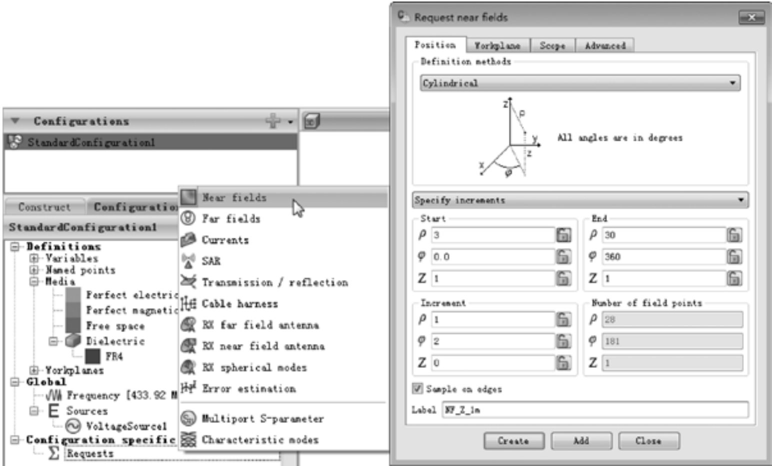


图 7-89 添加近场计算

（7）网格划分

在“Construct”选项卡中，选中“Geometry”→“BCM”结点，在“Details”中选中所有的面，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，在弹出的“Face properties”对话框中，选择“Meshing”选项卡，进行如下设置。

勾选：Local mesh size。

Mesh size：lam/100。

单击“OK”，按钮，如图 7-90 所示。

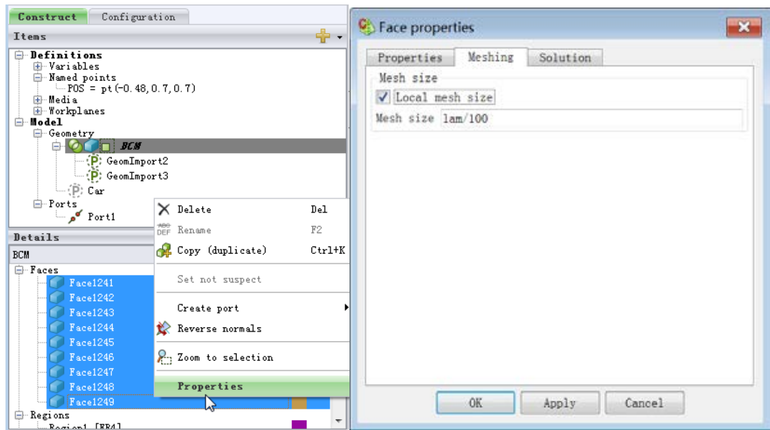


图 7-90 定义 BCM 模型局部网格

单击“Mesh”菜单中的“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Coarse。

Wire segment radius：1e-4。

选择“Advanced”选项卡，继续设置。

Suppression of small geometry features：Ignore。

Mesh quality：Mesh size growth rate 设置为 Fast。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 7-91 所示。车辆与 BCM 网格模型如图 7-92 所示。

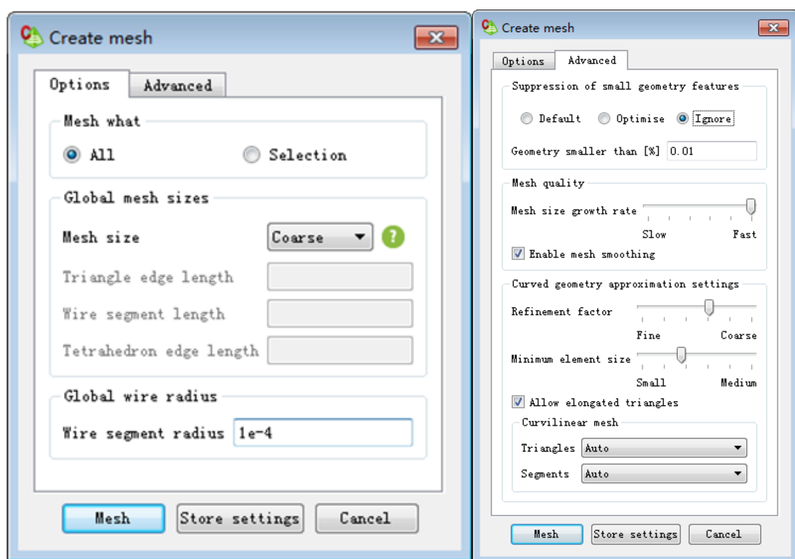


图 7-91　定义全局网格划分

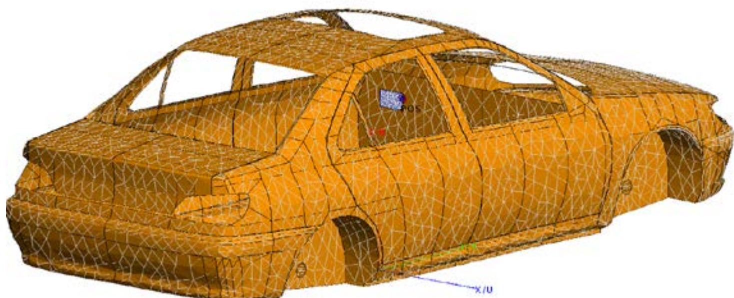


图 7-92　车辆与 BCM 网格模型

（8）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（9）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：直接进入 3D 模型，在“Home”菜单中单击“Near field”按钮下的“NF_Z_1m”，会在模型中显示 3D 场强分布云图，在右侧的控制面板的“Traces”区域内自动生成 NF_Z_1m，在控制面板中勾选“dB”复选框，如图 7-93 所示。

显示 2D 结果：在“Home”菜单中单击“Polar”，进入极坐标系“Polar graph1”，单击“Far field”→“ff_3D”，在右侧的控制面板的“Traces”区域内自动生成 ff_3D，选中“Traces”中的“ff_3D”，在右侧的控制面板中进行如下设置。

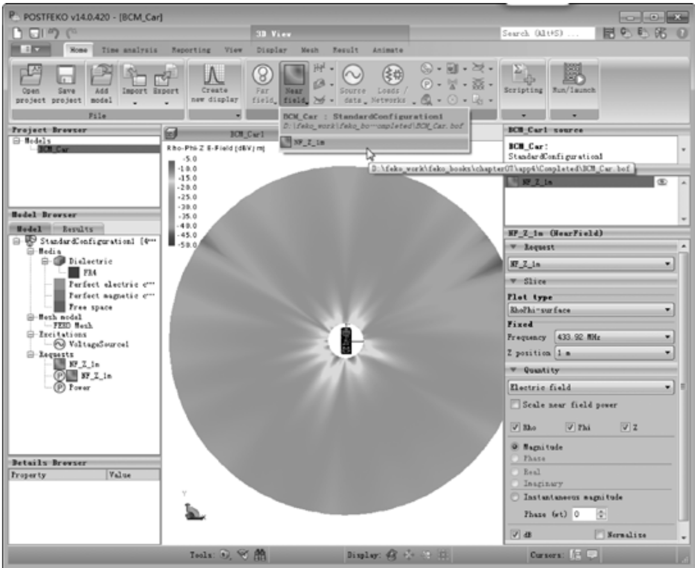


图 7-93　BCM 辐射场分布云图

Independent axis(Angular)修改为：Phi。

Theta：88 deg。

勾选：dB，如图 7-94 所示。

在极坐标图中单击鼠标右键，选择“Axis settings”选项，弹出“Axis settings（Polar graph)”对话框，选择“Radial”对话框，进行如下设置。

取消勾选：Automatically determine the grid ranges。

Maximum value：5。

Minimum value：-30。

单击“OK”按钮，如图 7-95 所示。

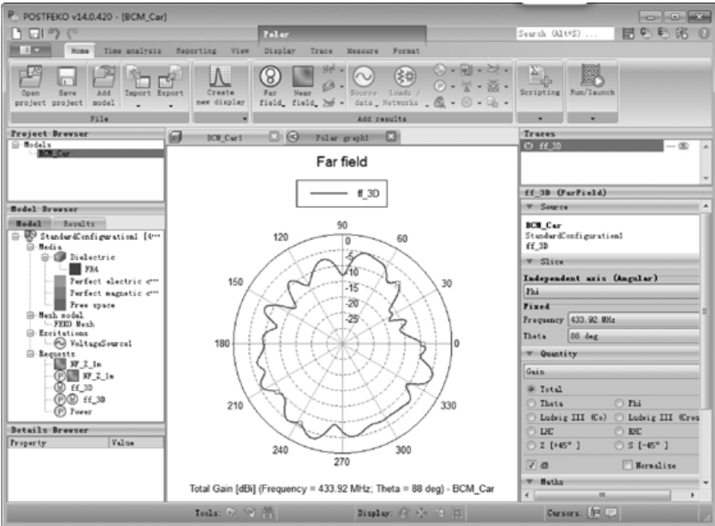


图 7-94　水平面 BCM 辐射方向图（Theta 为“88deg”）

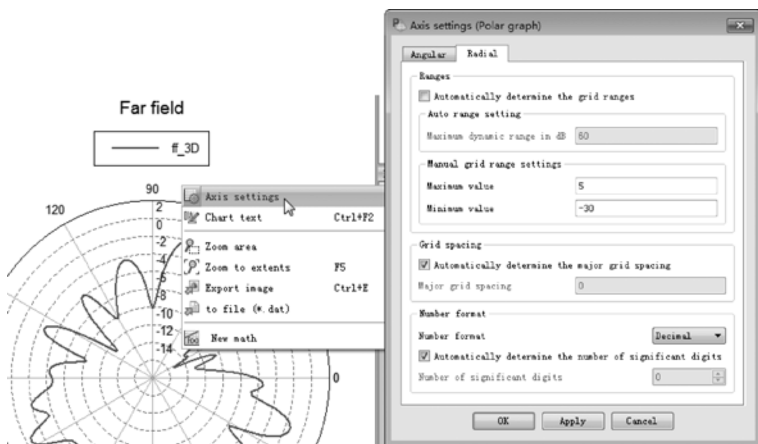


图 7-95　设置极坐标增益显示范围

添加车辆 3D 顶视图：在“Home”菜单中，在“Create new display”按钮下单击“3D View”→“StandardConfiguration1”，在 3D 视图区域，调整模型显示，车头朝上，如图 7-96 所示。

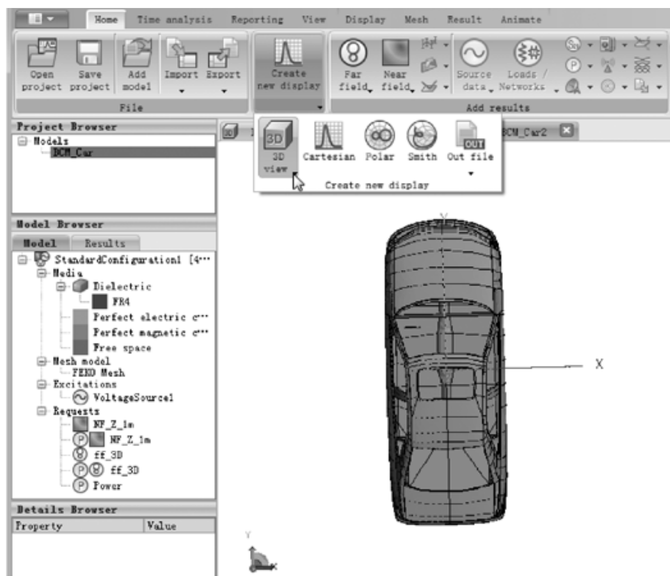


图 7-96　新建 3D 视图“BCM_Car2”

切换到“Polar graph1”，进入“Display”菜单，单击“Chart image”按钮下的“BCM_Car2”，将车辆模型显示在 2D 极坐标图中。

添加智能光标：在右侧的控制面板中，选中“Traces”区域内的“ff_3D”，进入“Measure”菜单，单击“Point”按钮下的“Global minimum”，添加增益最小对应的角度。光标显示车头部右侧 Phi 为“26 deg”，增益显著下降，遥控的有效距离相对其他角度较短，如图 7-97 所示，通过仿真评估安装位置是否满足遥控钥匙的性能要求，优化 BCM 天线的安装位置。

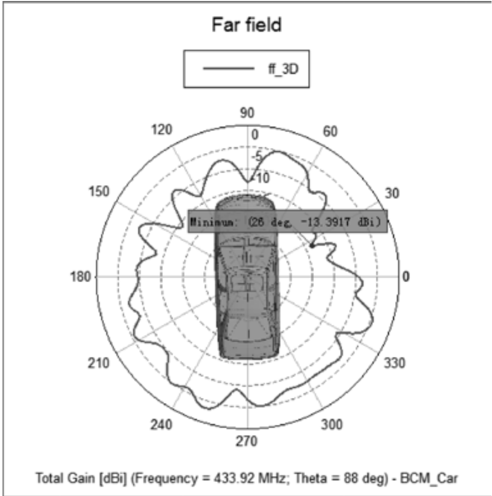


图 7-97　水平面 BCM 辐射方向图（含 3D 车身模型）

在“Home”菜单中单击“Save project”按钮，保存计算结果，关闭 POSTFEKO。

第 8 章



工程仿真案例 4——复杂线缆束EMC

8.1　复杂线缆束 EMC 分析流程
8.2　复杂线缆束 EMC 仿真在 FEKO 中的实现

8.1　复杂线缆束EMC分析流程

CADFEKO 支持复杂线束电磁辐射、抗干扰以及串扰分析，采用新的 MTL/MoM 混合技术分析线缆 EMC，详细的仿真流程如图 8-1 所示。

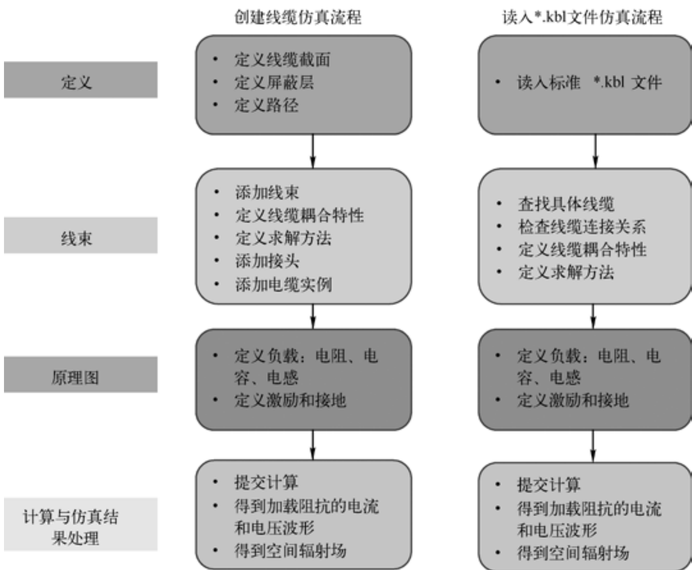


图 8-1　线束仿真流程

8.2　复杂线缆束EMC仿真在FEKO中的实现

8.2.1　线缆类型与快速建模

CADFEKO 线缆功能菜单如图 8-2 所示。

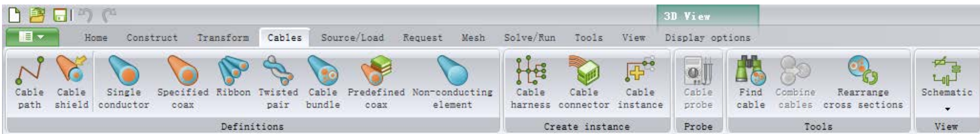


图 8-2　CADFEKO 线缆功能菜单

（1）线缆路径可自由定义（见图 8-3）：定义可导入*.csv 表格式数据，路径也可从 nastran 数据导入。支持单线、双绞线、排线、同轴线和任意复杂线缆束等类型（见图 8-4～图 8-6）；可将 MTL 算法与 MoM 及 MLFMM 算法混合求解。

（2）支持线缆屏蔽层定义（见图 8-7）：实体屏蔽层，编织网屏蔽层（见图 8-8），根据测试数据定义屏蔽层。

（3）线缆截面定义与路径绑定：可指定辐射电缆和非辐射电缆，加载串联/并联 RLC 电路，指定激励源和负载，以及探针点位置，如图 8-9～图 8-11 所示。

线缆原理图与 3D 模型示例如图 8-12 所示。

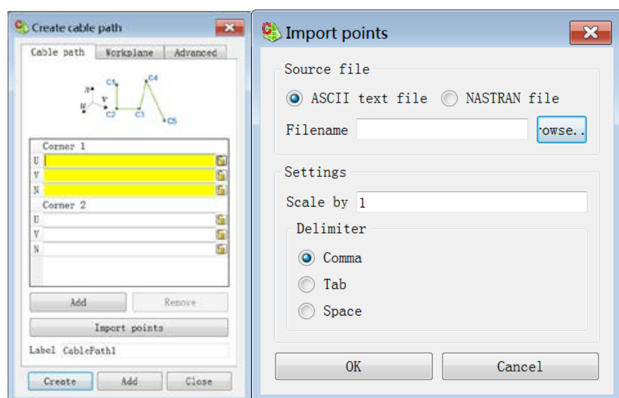


图 8-3　线缆路径定义

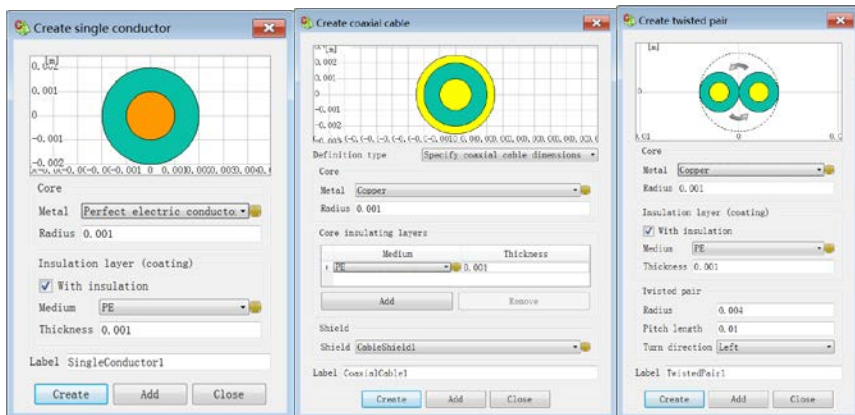


图 8-4　单线、同轴线、双绞线定义界面

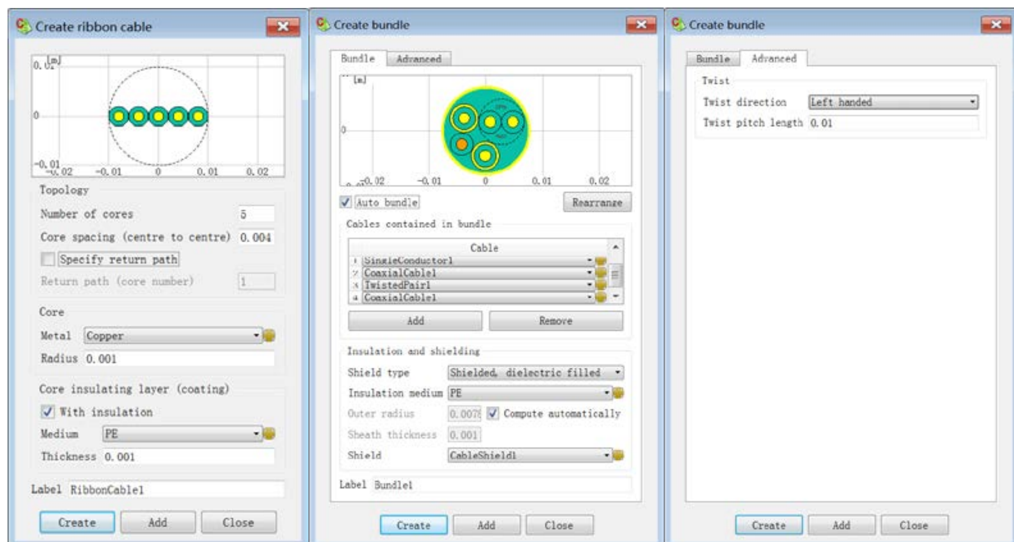


图 8-5　平行排线、任意形式复杂线束与绞距定义

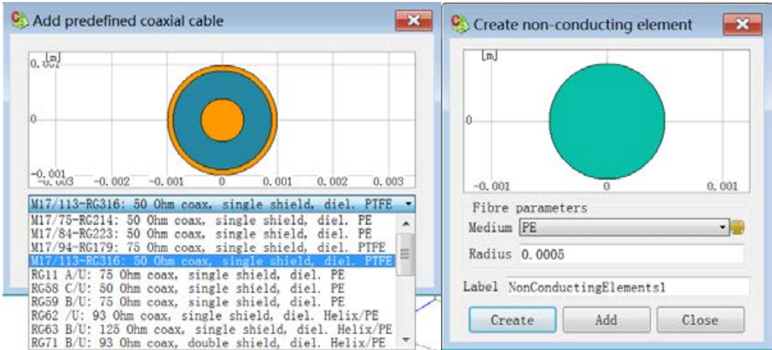


图 8-6　同轴线缆库图与定义光纤线缆

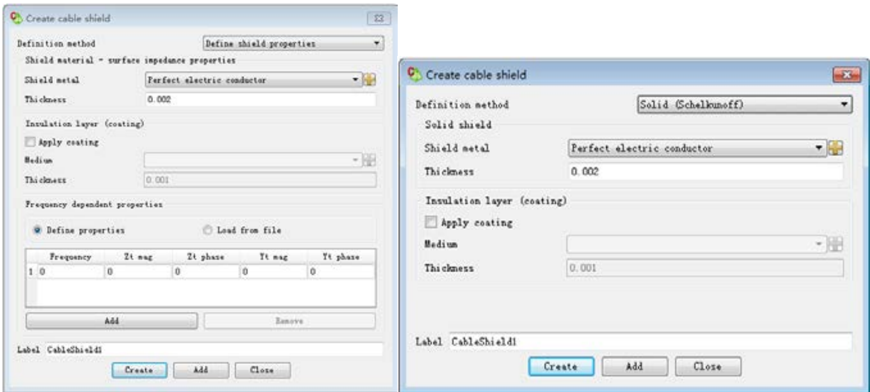


图 8-7　线缆屏蔽层定义

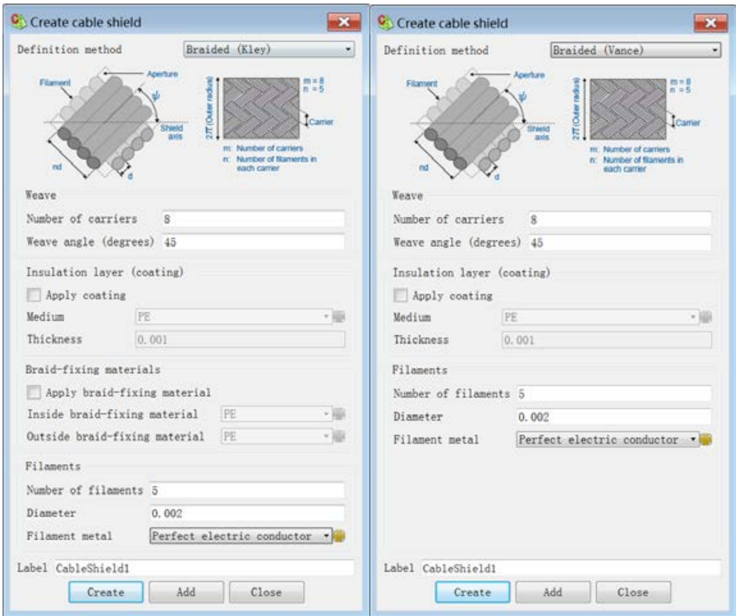


图 8-8　线缆编织网屏蔽层定义界面

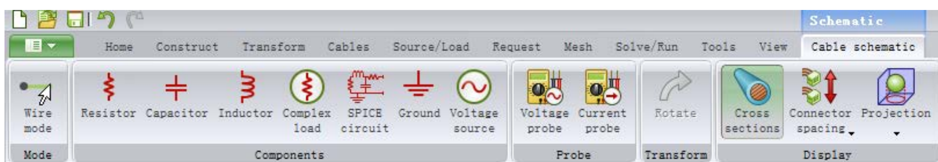


图 8-9　原理图负载、激励与探头

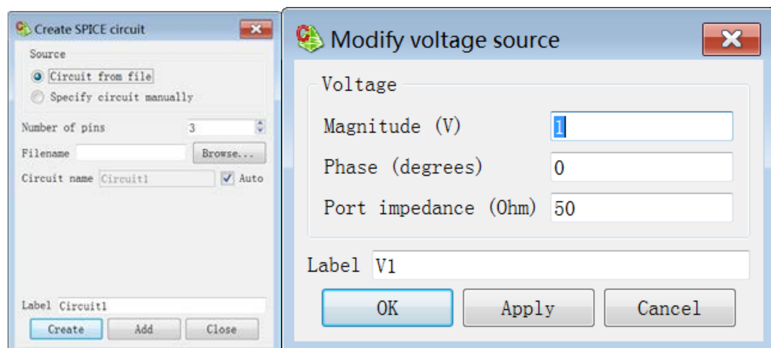


图 8-10　读入 SPICE 电路与定义电压激励

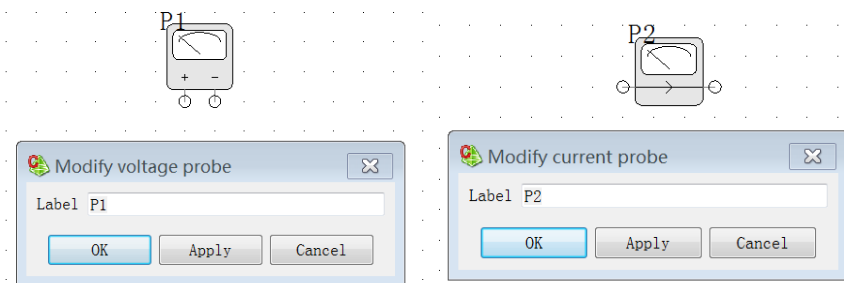


图 8-11　定义电压与电流探头

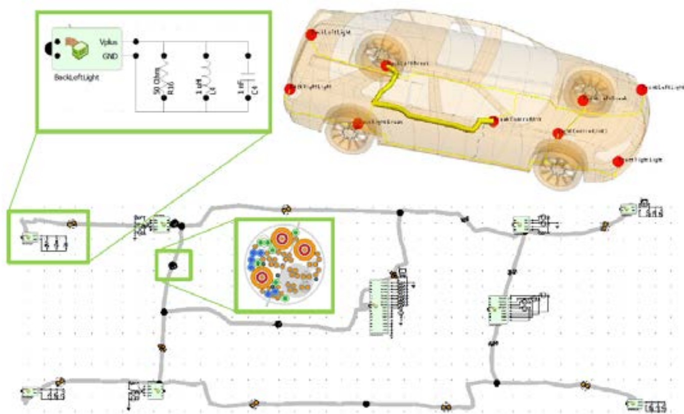


图 8-12　线缆原理图与 3D 模型

8.2.2 天线与屏蔽线缆束的场线耦合

单极子天线与线束耦合分析，理想地面上单极子天线辐射，分析屏蔽线缆端口电磁感应信号。启动 CADFEKO，新建一个工程：Cable_Coupling.cfx，单位采用默认 m。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

最低频率：fmin=1e6。

最高频率：fmax=35e6。

单极子线径：wireRadius=1e-3，如图 8-13 所示。

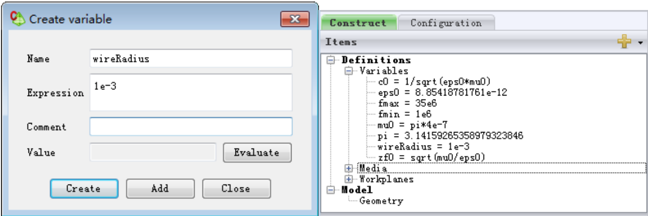


图 8-13 定义变量

（2）模型建立

单极子天线模型：进入“Construct”菜单，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，在“Geometry”选项卡中进行如下设置。

Start point：(U：0.0; V：0.0; N：0.0)。

End point：(U：0.0; V：0.0; N：10)。

Label：monopole。

单击“Create”按钮，如图 8-14 所示。

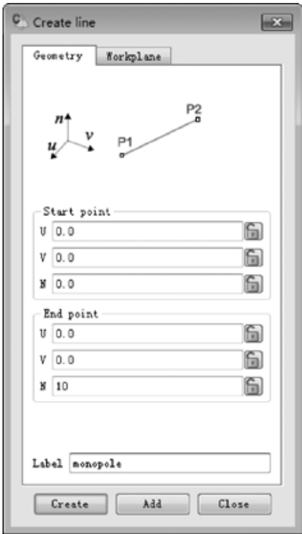


图 8-14 定义单极子天线模型

理想金属地面模型：在左侧的树形浏览器的“Construct”选项卡中，选中“Model”结点，单击鼠标右键，选择“Plane/ground”选项，弹出“Plane/ground”对话框，进行如下设置。

选中 Perfect electric (PEC) ground plane at Z=0。

单击“OK”按钮，如图 8-15 所示。

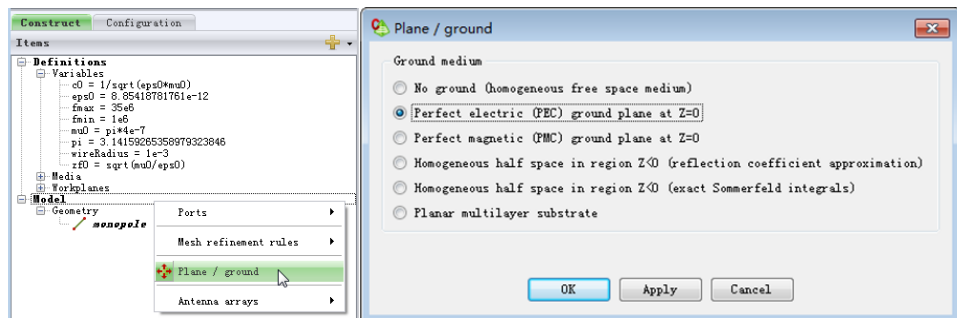


图 8-15　定义理想金属地面模型

（3）设定端口

在左侧的树形浏览器中，选中新建的模型“monopole”，在其“Details”中，展开“Wires”结点，选择“Wire1”，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，弹出“Create wire port(geometry)”对话框，进行如下设置。

Location on wire：Start。

Label：Port1。

单击“Create”按钮，如图 8-16 所示。

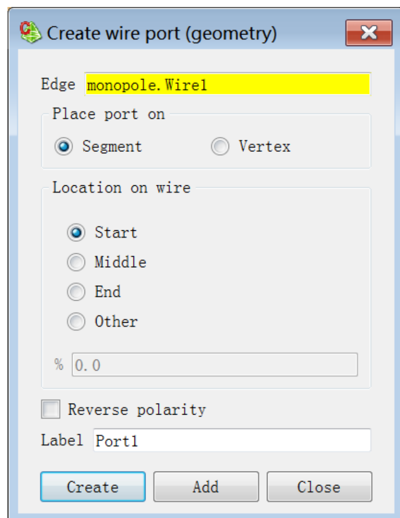


图 8-16　定义单极子天线端口

（4）定义线缆路径

进入“Cables”菜单，单击“Cable path”按钮，弹出“Create cable path”对话框，进行如下设置。

Corner 1：(U：0, V：2, N：0.01)。

Corner 2：(U：10, V：2, N：0.01)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 3：(U：10, V：5, N：0.01)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 4：(U：7, V：8, N：0.01)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 5：(U：0, V：8, N：0.01)。

Label：CablePath。

单击“Create”按钮，如图 8-17 所示。

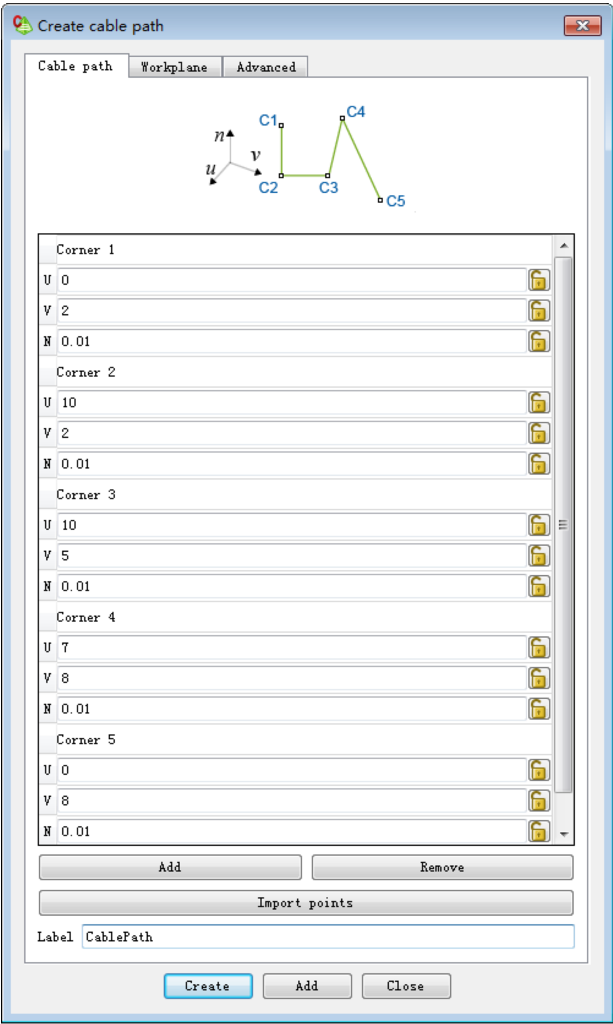


图 8-17　定义线缆走线路径

（5）定义线缆类型

进入“Cables”菜单，单击“Predefined coax”按钮，弹出“Add predefined coaxial

cable”对话框，进行如下设置。

从自带同轴线缆库中选择：RG58 C/U：50 Ohm coax, single shield, diel. PE。

Label：RG58。

单击“Create”按钮，如图 8-18 所示。

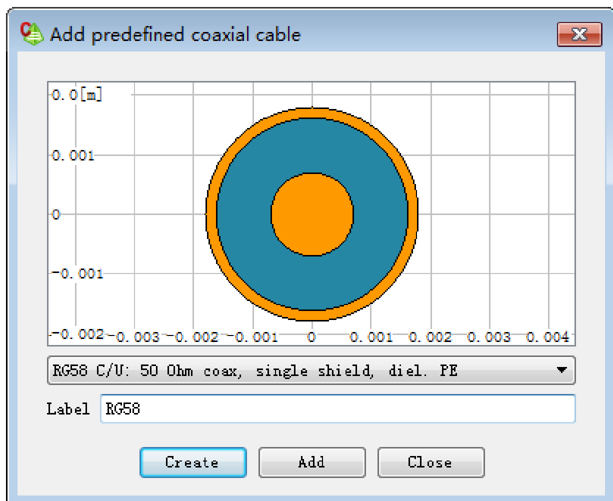


图 8-18　选择线缆库中 RG58 型号同轴线

（6）定义线束拓扑（Cable Harness）

单击“Cables”菜单中的“Cable harness”按钮，如图 8-19 所示，在左侧树形浏览器的“Configuration”选项卡中展开“Global”结点，在“Cable harness”结点下会自动生成“CableHarness1”。

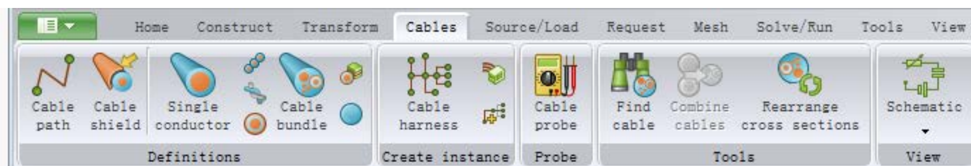


图 8-19　创建线缆拓扑“CableHarness1”

（7）创建 Cable Connector

选中新定义的“CableHarness1”，单击鼠标右键，选择“Cable connector”选项，弹出“Create connector”对话框，进行如下设置。

选中：Cable path terminal。

Path terminal：CablePath.Start。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

1：Live。

2：Ground。

Label：StartConnector，如图 8-20 所示。

单击下部的“Add”按钮，继续设置。

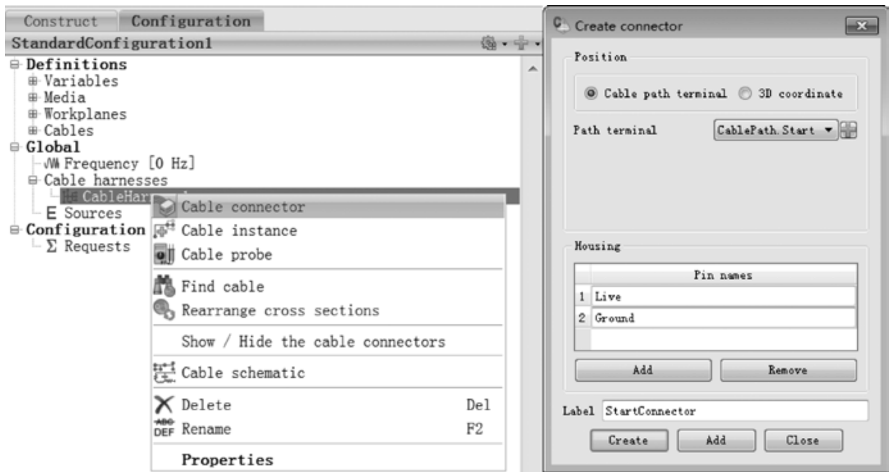


图 8-20　生成 StartConnector

“Path terminal”修改为：CablePath1.End。

Label：EndConnector。

单击“Create”按钮，如图 8-21 所示。

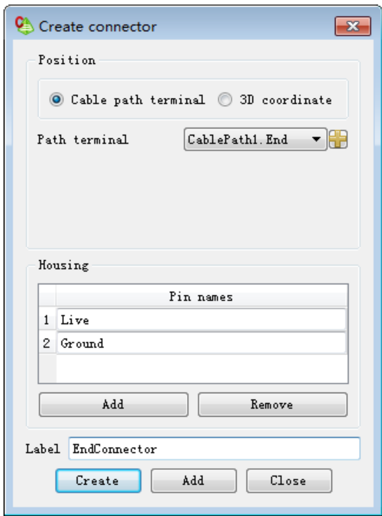


图 8-21　生成 EndConnector

（8）创建 Cable Instance

在“Cables”菜单中，单击“Cable instance”按钮，弹出“Create cable instance”对话框，进行如下设置。

Cable type：RG58。

Source：StartConnector。

Destination：EndConnector。

勾选：Select shortest route。

然后按照图 8-22 所示定义“Signals and connectors”。

Label：Cable1。

单击“Create”按钮。

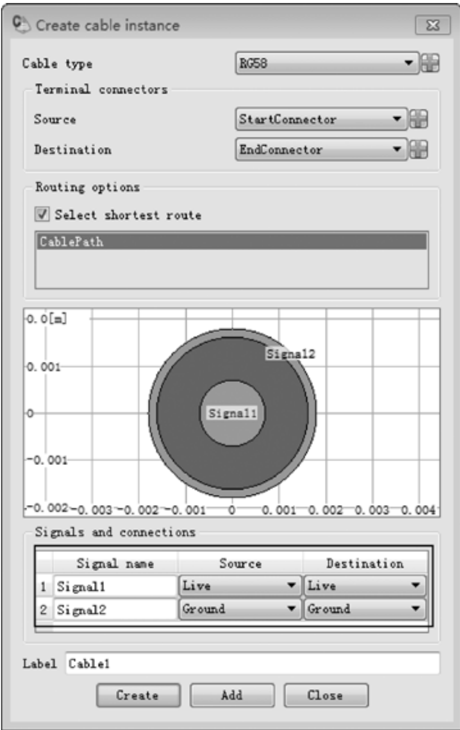


图 8-22 定义 Cable Instance

（9）创建线束外围电路

在“Cables”菜单中，单击右侧的“Schematic”→“CableHarness1”，进入线束原理图编辑界面（或在左侧的树形浏览器中，选中“CableHarness1”，单击鼠标右键，选择“Cable schematic”选项，如图 8-23 所示）。

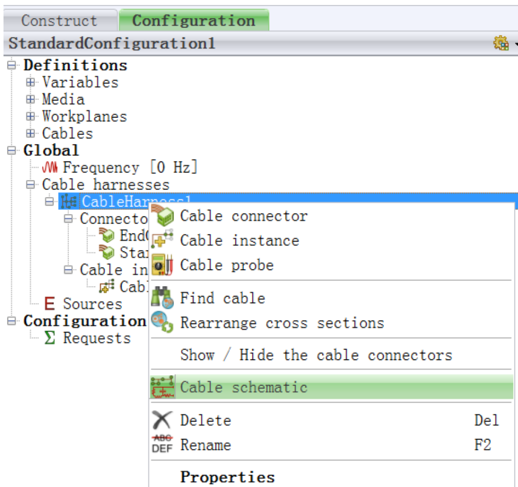


图 8-23 打开线束电路原理图

在“Cable schematic”菜单中单击“Resistor”按钮，在原理图中，添加了一个“Resistor”，调整位置（旋转、拖动），双击其图标，弹出“Modify resistor”对话框，进行如下设置。

修正阻值为 50Ohm。

Label：R1。

勾选：Probe Voltage 和 Probe current。

单击“OK”按钮，如图 8-24 所示。

在“Cable schematic”菜单中单击“Ground”按钮，在原理图中添加了一个“Ground”接地符号。在 StartConnetctor 端的 Live 与 Ground 之间跨接该电阻 R1；Ground 管脚添加接地符号。

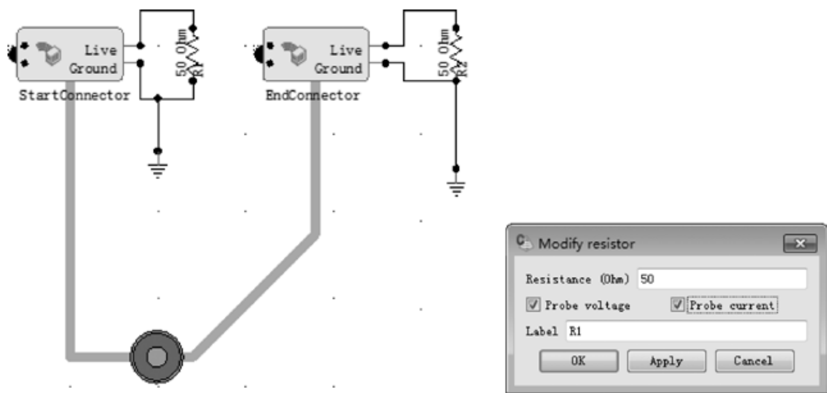


图 8-24　在 StartConnector1 和 EndConnector2 端定义连接电阻

重复上述操作，在 EndConnetctor 端定义另外一个电阻“Resistor”，双击其图标，修改其阻值为 50，名称 Label 定义为 R2，在 EndConnetctor 端的 Live 与 Ground 之间跨接该电阻。Ground 管脚添加接地符号。

（10）激励加载

在左侧的树形浏览器中选项“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮完成设置，如图 8-25 所示。

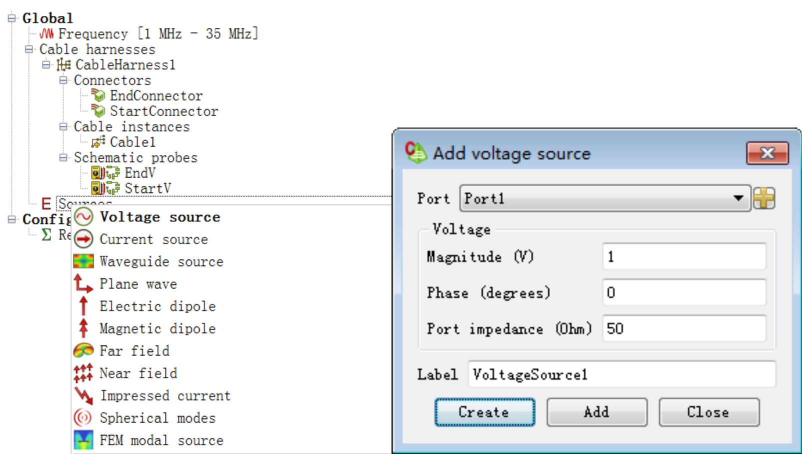


图 8-25　设置电压源为 1V，端口参考阻抗为 50Ohm

（11）定义发射功率

在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中，选中“Global”结点并单击鼠标右键，选择“Power”选项，弹出“Power settings”对话框，进行如下设置。

Scale settings：Total source power（no mismatch）。

Source power（Watt）：10。

单击“Create”按钮，如图 8-26 所示。

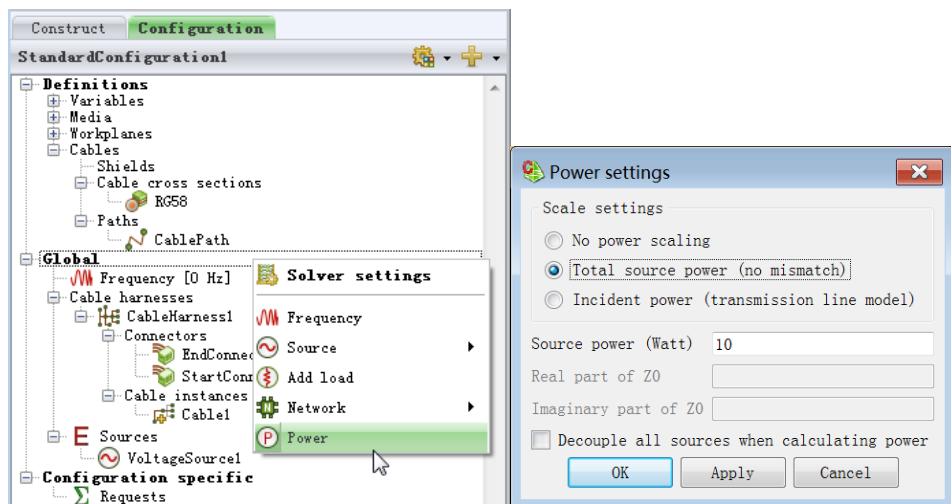


图 8-26　设置天线发射功率

（12）电参数设置

在左侧树型浏览器中，保持在“Configuration”选项卡中，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Continuous(Interpolated) range。

Start frequency (Hz)：fmin。

End frequency(Hz)：fmax。

进入“Advanced”选项卡。

Specify maximum number of samples：101。

单击“OK”按钮，如图 8-27 所示。

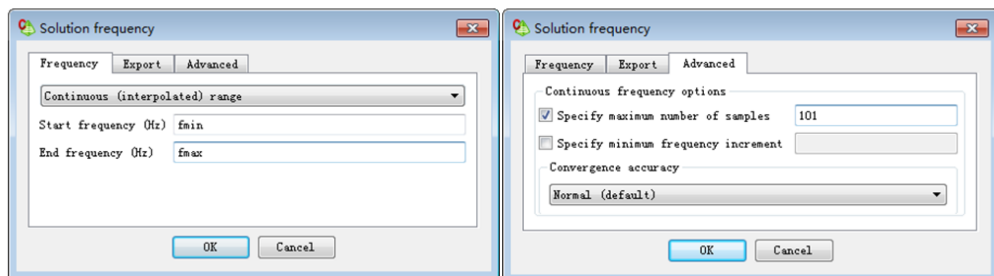


图 8-27　设置工作频率

（13）网格生成

进入“Mesh”菜单，单击“Create Mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，进行如下设置。

Mesh size：Standard。

Wire segment radius：wireRadius。

单击“Mesh”按钮，如图 8-28 所示。

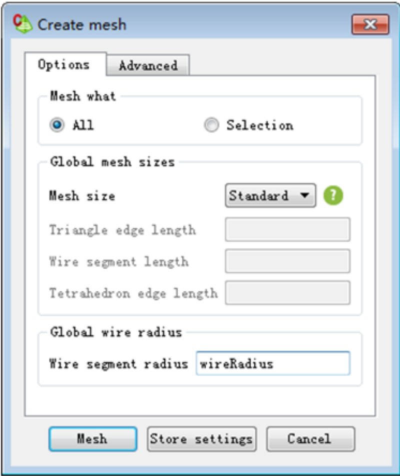


图 8-28　生成网格

（14）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（15）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 2D 结果：在“Home”菜单中单击“Cartesian”按钮，进入直角坐标系“Cartesian Graph1”。单击“Probes”下拉按钮，然后依次单击“R1”和“R2”，直角坐标图中显示线缆起始端口和终端端口的感应电流，在右侧控制面板的“Traces”区域内同时选中 R1 和 R2，勾选“dB”复选框，如图 8-29 所示。

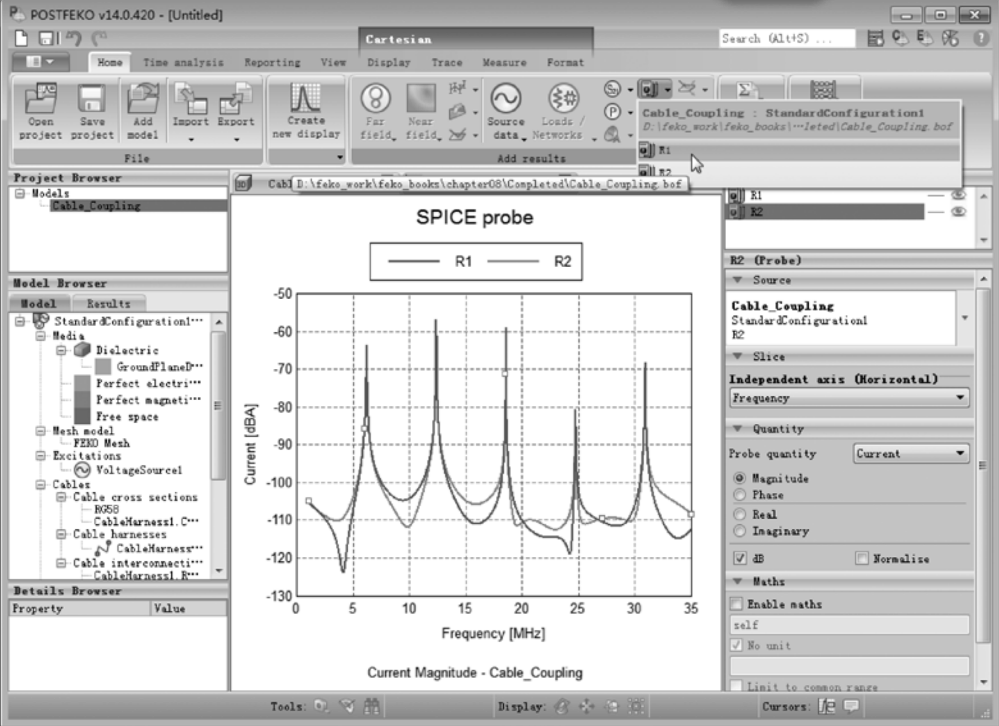


图 8-29　线缆起始和终止端口的耦合电流

在右侧控制面板的“Traces”区域内依次单击 R1 和 R2，修改“Probe quantity”为“Voltage”，结果显示如图 8-30 所示。

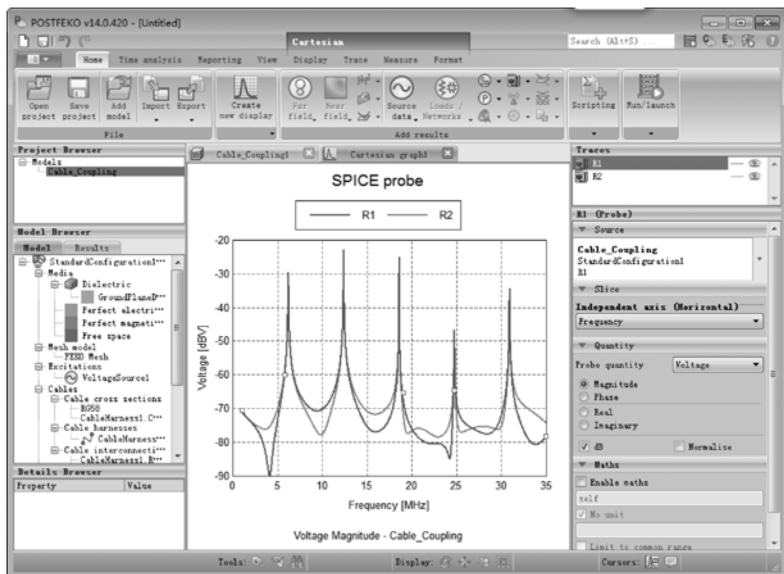


图 8-30　线缆起始和终止端口 R1 和 R2 的电压

在“Home”菜单中单击“Save Project”按钮，保存计算结果文件，退出 POSTFEKO。

8.2.3　线缆束的辐射与抗干扰仿真

启动 CADFEKO，打开自带的工程文件（位于“.../chapter08/app2/Started/”）“Shielded_Two_ Wire_Bench_Base.cfx”，在该工程中，已经定义了各种参量和材料。

（1）模型导入

单击“Home”菜单（或左上角的主菜单）中的“Import”按钮下的“Mesh”，弹出“Import mesh”对话框，进行如下设置。

在“Advanced”选项卡中，修正“Scale factor to metres”的值为 0.01，其他参数保持默认，如图 8-31 所示。

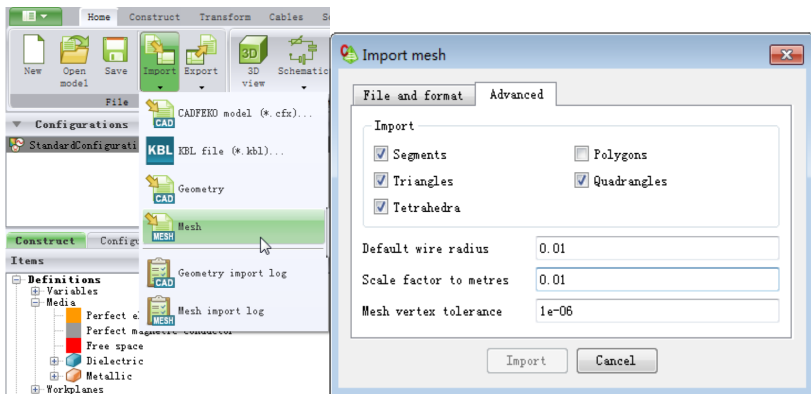


图 8-31　读入模型

在“File and format”选项卡中，单击“Browse”按钮，找到自带的网格文件（位于“…/chapter08/app2/Include/”）“Bench.nas”，直接读入，如图 8-32 所示。

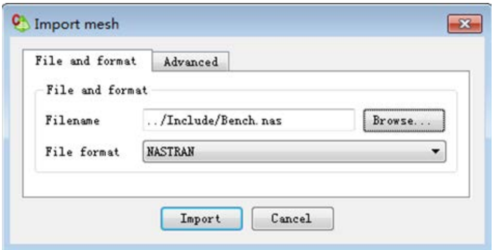


图 8-32 读入网格模型

按〈F5〉键适中显示模型，把新导入的网格模型更名为“Bench”，如图 8-33 所示。

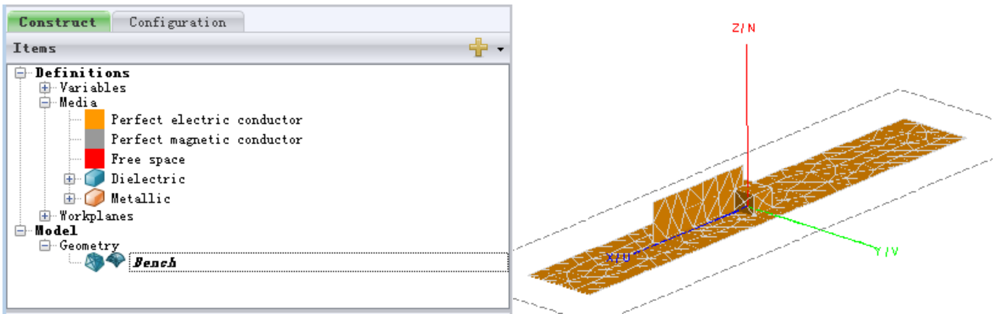


图 8-33 导入载体的网格模型

（2）把网格模型转成几何模型

在左侧的树形浏览器的“Construct”选项卡中，展开“Model”→“Geometry”结点，选中模型“Bench”，单击鼠标右键，选择“Use model mesh”选项，把网络模型转成几何模型，如图 8-34 所示。

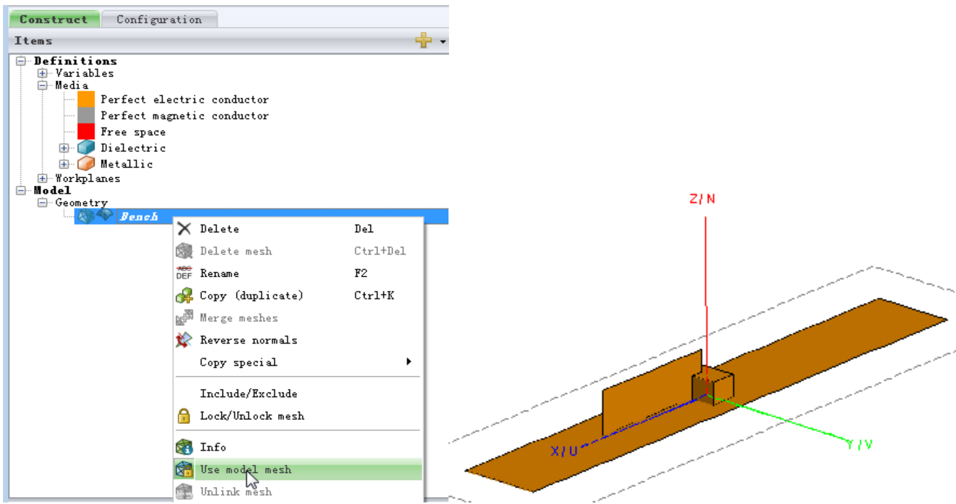


图 8-34 将网格模型设置为几何模型

（3）读入线缆路径文件

进入“Cables”菜单，单击“Cable path”按钮，弹出“Create cable patch”对话框，进行如下设置。

单击“Import points”按钮，弹出“Import points”对话框，进行如下设置。

读入文件“…/chapter08/app2/Include/Cable_path.txt”。

将“Delimiter”修改为“Tab”，单击“OK”按钮。单击“Create”按钮，如图 8-35 所示。

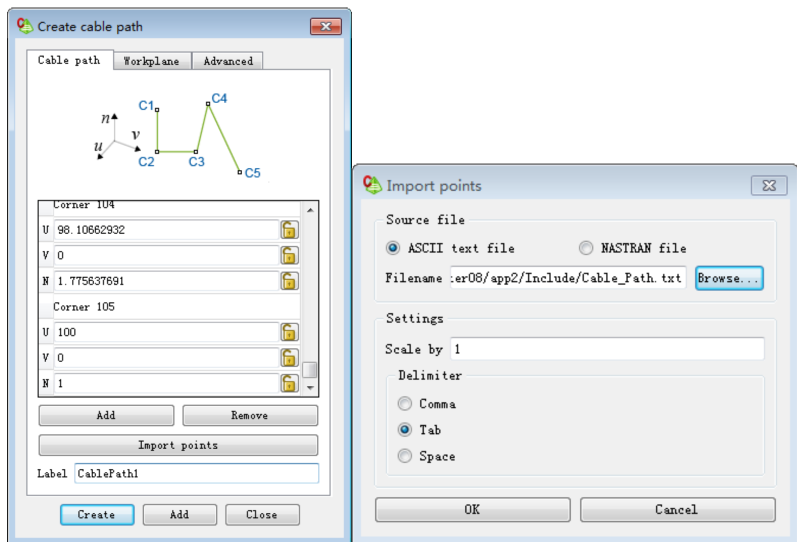


图 8-35　读入线缆走线坐标文件

线缆读入后显示如图 8-36 所示。

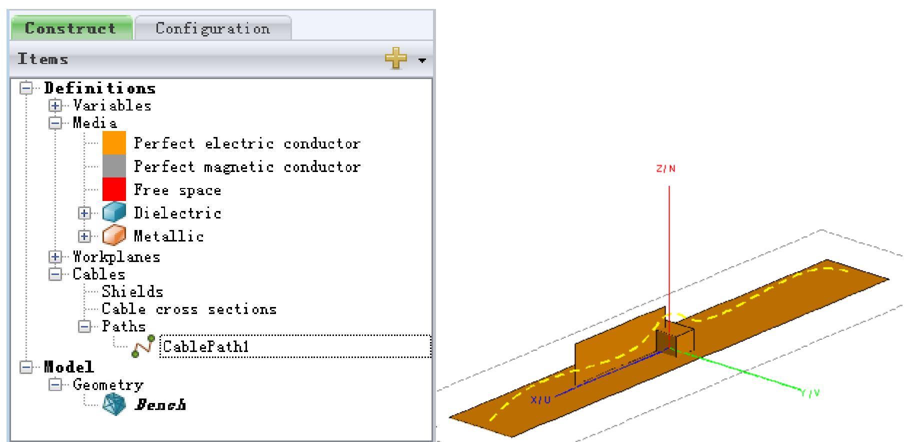


图 8-36　读入线缆走线之后的显示

（4）网格剖分规则设置

进入“Mesh”菜单，单击“Polyline refinement”按钮，弹出“Add polyline refinement”对话框，进行如下设置。

单击“Import points”按钮，弹出“Import points”对话框，进行如下设置。

单击“Browse”按钮读入文件“.../chapter08/app2/Include/Cable_path.txt”。

将“Delimiter”修改为“Tab”，单击“OK”按钮。

Radius：tL1。

Mesh size：tL1。

单击“Create”按钮，如图 8-37 所示。

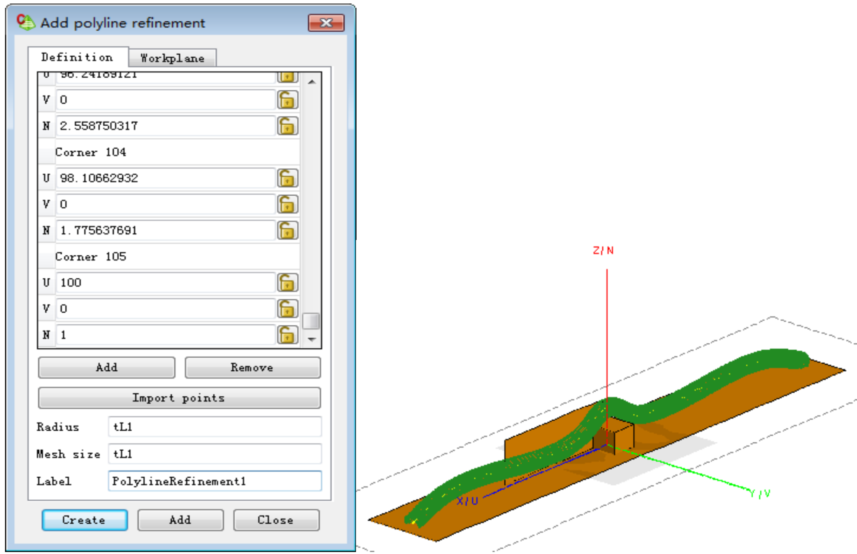


图 8-37　定义剖分规则

（5）生成网格

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Standard。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 8-38 所示。

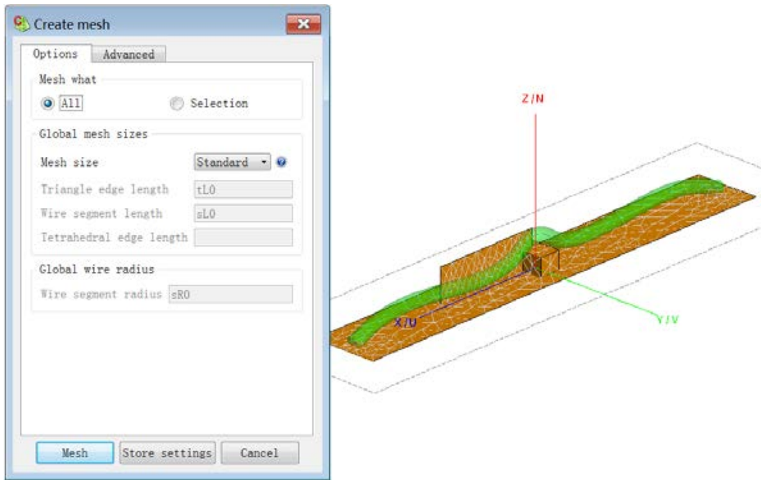


图 8-38　网格划分

（6）线缆定义与设置

定义屏蔽层：单击“Cables”菜单中的“Cable shield”按钮，弹出“Create cable shield”对话框，进行如下设置。

Definition method：Solid (Schelkunoff)。

Shield metal：“Bundle_Shield”。

Thickness：Bundle_Shield_t。

单击“Create”按钮，如图 8-39 所示。

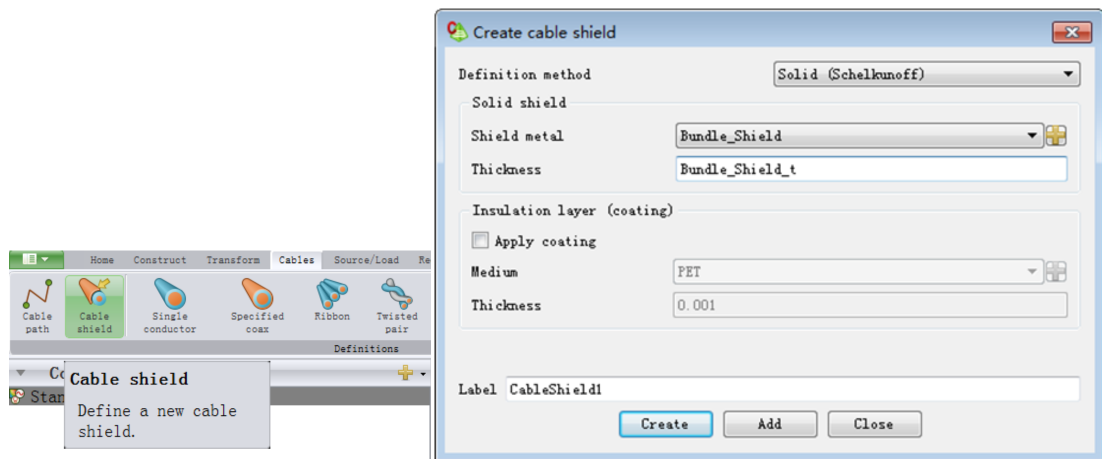


图 8-39　定义线缆屏蔽层

定义单线（Single Conductor）：单击“Cables”菜单中的“Single conductor”按钮（或在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中，展开“Cables”结点，选中“Cable cross sections”，单击鼠标右键，选择“Single conductor”选项），弹出“Create single conductor”对话框，进行如下设置。

Metal：Bundle_Wire。

Radius：Wire_1_r。

不勾选：With insulation。

Label：Wire_1。

单击“Add”按钮，继续设置。

Radius：Wire_2_r。

Label：Wire_2。

单击“Create”按钮，如图 8-40 所示。

定义线束（Cable bundle）：单击“Cables”菜单中的“Cable bundle”按钮（或在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中，展开“Cables”结点，选中“Cable cross sections”，单击鼠标右键，选择“Cable bundle”选项），弹出“Create bundle”对话框，进行如下设置。

不勾选：Auto bundle。

Cables contained in bundle 部分：

Cable：“Wire_1”。

Offset X：Wire_1_dx

Offset Y：0.0。

Rotation：0.0。

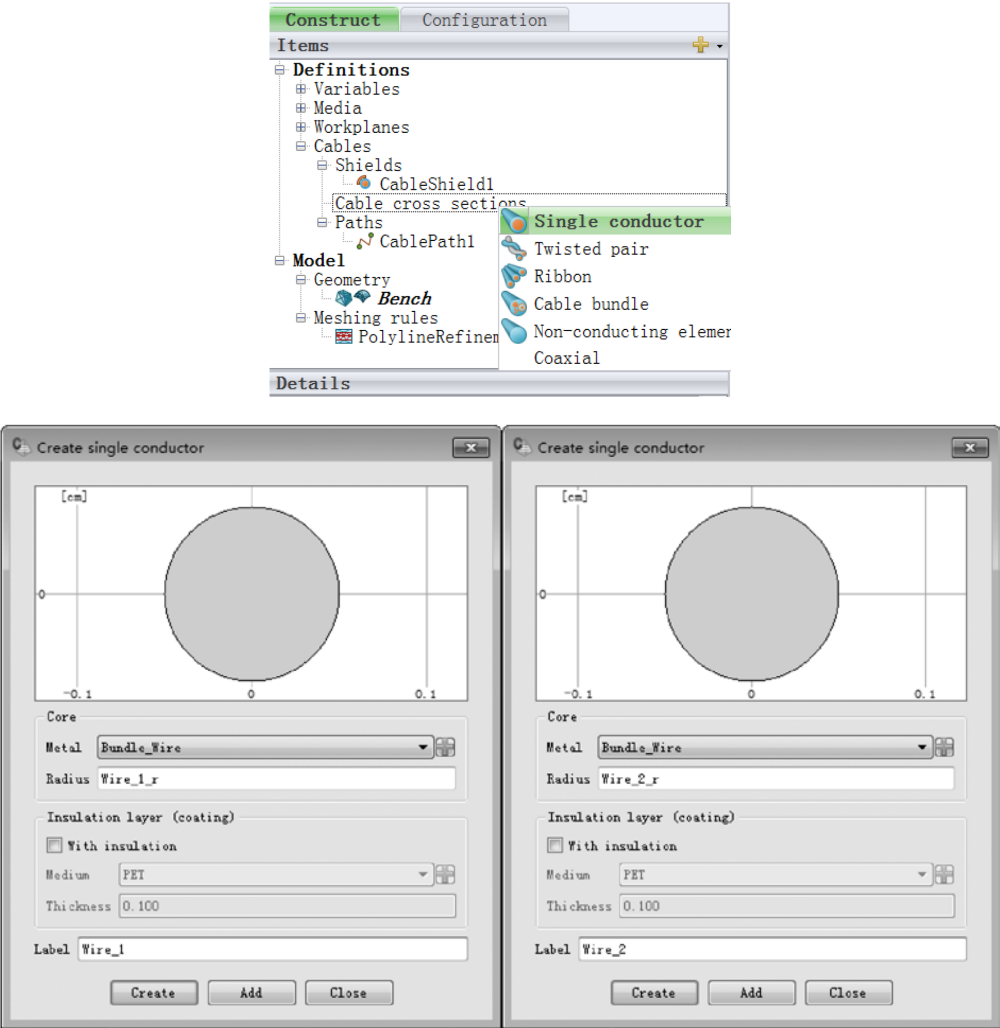


图 8-40　创建单线 Wire_1 和 Wire_2

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Cable：Wire_2。

Offset X：Wire_2_dx。

Offset Y：0.0。

Rotation：0.0。

Shield type：Shielded, dielectric filled。

Insulation medium：PET。

不勾选：Compute automatically。

Outer radius：Bundle_r。

Shield：CableShield1

Label：Bundle1。

单击“Create”按钮完成创建，如图 8-41 所示。

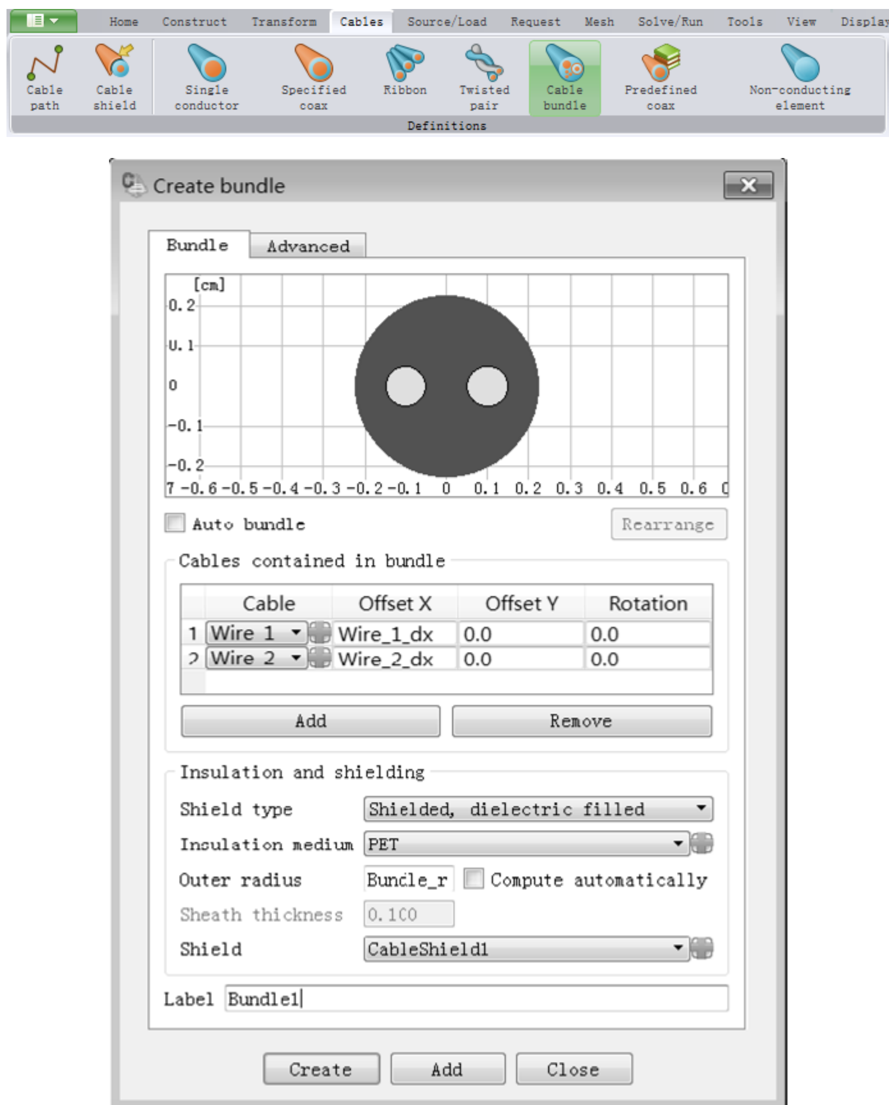


图 8-41　创建线缆束

把当前工程另存为“Shielded_Two_Wire_Bench_Irrad_MTL.cfx”。

定义线束拓扑（Cable Harness）：单击“Cables”菜单中的“Cable harness”按钮，在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项中，在“Global”结点下会自动生成“CableHarness1”，如图 8-42 所示。

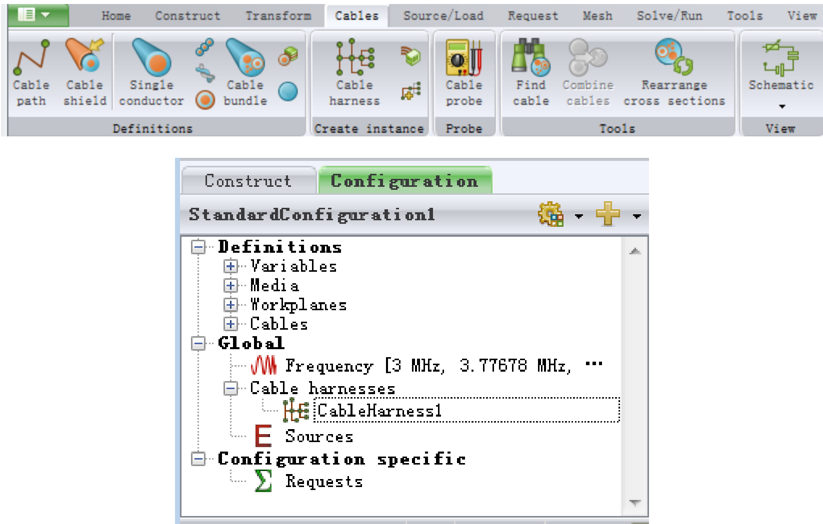


图 8-42　创建线缆拓扑-Cable harness

（7）创建 Cable Connector

选中新定义的“Cableharness1”，单击鼠标右键，选择“Cable connector”选项，弹出“Create connector”对话框，进行如下设置。

选中：Cable path terminal。

Path terminal：CablePath1.Start。

单击中间的“Add”按钮两次，继续设置。

Pin1：MyPin1。

Pin2：MyPin2。

Pin3：MyPin3。

Label：C1

单击“Create”按钮，如图 8-43 所示。

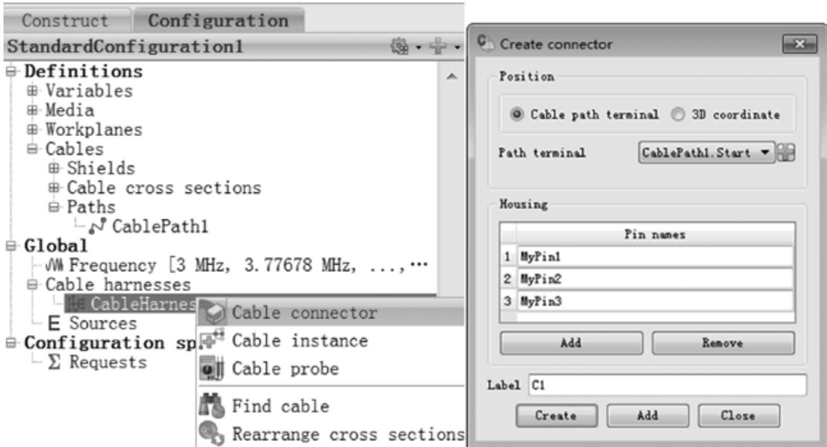


图 8-43　生成 Connector-C1

在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中，选中位于“Global”→“Cable Harness”→“Cable harness1”→“Connectors”中新创建的“C1”，单击鼠标右键，选择“Copy(Duplicate)”选项，把新生成的“C1_1”更名为“C2”。双击“C2”，弹出“Modify connector”对话框，进行如下设置。

Path terminal：CablePath1.End。

单击“OK”按钮，如图 8-44 所示。

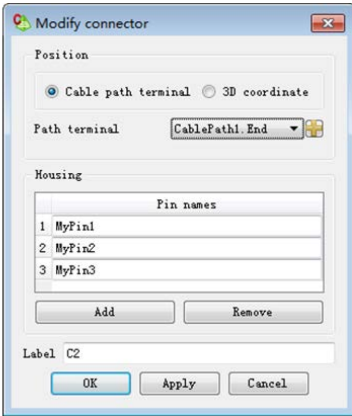


图 8-44　修正“C2”

（8）创建 Cable Instance

在“Cables”菜单中，单击“Cable instance”按钮，弹出“Create cable instance”对话框，进行如下设置。

Cable type：Bundle1。

Source：C1。

Destination：C2。

勾选：Select shortest route。

按照图 8-45 所示定义“Signals and connections”。

Label：Cable1。

单击“Create”按钮。

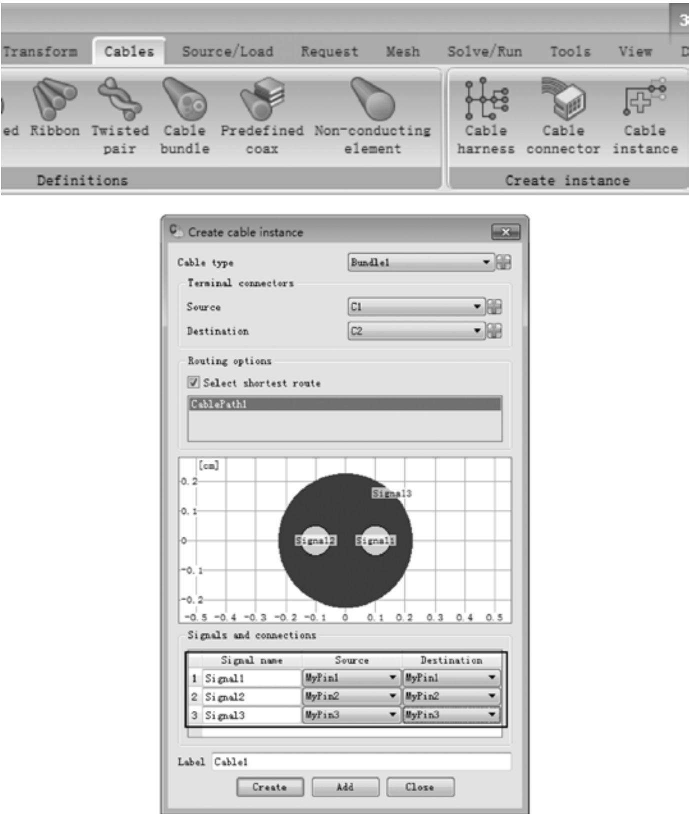


图 8-45　定义 Cable Instance

（9）创建线束外围电路

在“Cables”菜单中，单击“Schematic”按钮下的“CableHarness1”，进入线束原理图编辑界面。

单击“Cable schematic”菜单，在原理图中添加一个“Resistor”，调整位置（旋转、拖动），双击其图标，弹出“Modify resistor”对话框，进行如下设置。

修正阻值为 75Ohm。

勾选：Probe voltage 和 Probe current。

Label：C1_Z12。

单击“OK”按钮。在 C1 端的 MyPin1 与 MyPin2 之间跨接该电阻。

重复上述操作，在 C2 端定义另外一个电阻“Resistor”，双击其图标，弹出“Modify resistor”对话框，进行如下设置。

修改其阻值为 75Ohm。

勾选：Probe voltage 和 Probe current。

Label：C2_Z12。

单击“OK”按钮，如图 8-46 所示。在 C2 端的 MyPin1 与 MyPin2 之间跨接该电阻，如图 8-47 所示。

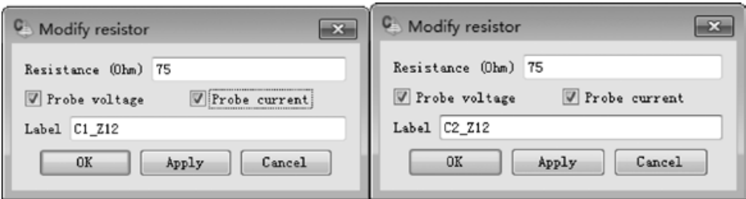


图 8-46　定义电阻 C1_Z12 和 C2_Z12

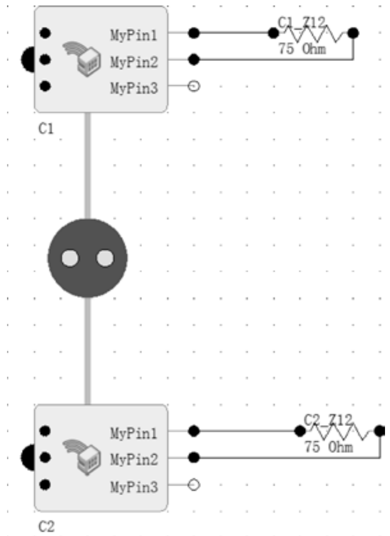


图 8-47　在 C1 和 C2 端定义连接电阻

在原理图中，添加一个“Capacitor”，调整位置（旋转、拖动），双击其图标，修正容值为“10e-12”，名称 Label 定义为“C1_Z13”，在 C1 端的 MyPin1 和 MyPin3 之间跨接该电容。

重复上述操作，在 C2 端定义另外一个电容“Capacitor”，双击其图标，修改其容值为“10e-12”，名称 Label 定义为“C2_Z13”，在 C2 端的 MyPin1 与 MyPin3 之间跨接该电容，如图 8-48 所示。

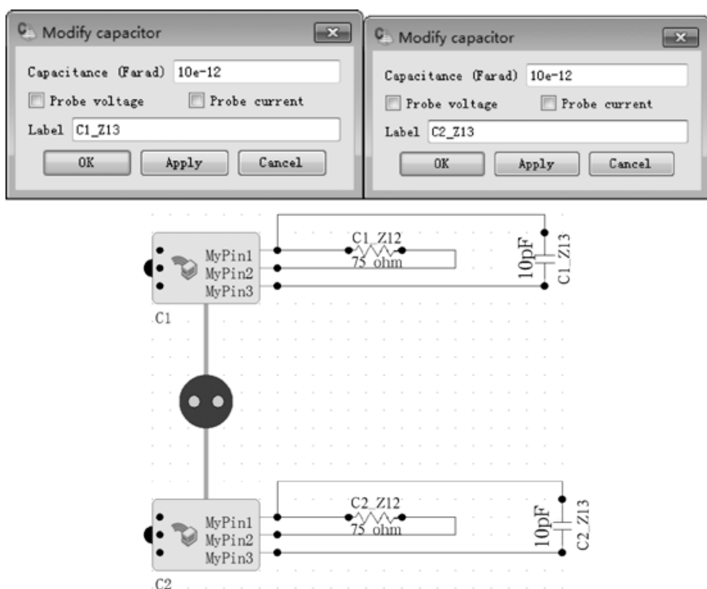


图 8-48　在 C1 和 C2 端定义连接电容

在原理图中，添加两个地符号“Ground”，调整位置（旋转、拖动）。

在原理图中，添加一个电感“Inductor”，调整位置（旋转、拖动），双击其图标，弹出“Modify inductor”对话框，进行如下设置。

修正其电感值为 10e-9 H。

勾选：Probe voltage 和 Probe current。

Label：C1_Z30。

在 C1 端的 MyPin3 与地之间跨接该电感。

在原理图中，添加一个电阻“Resistor”，调整位置（旋转、拖动），双击其图标，弹出“Modify resistor”对话框，进行如下设置。

修正其电阻值为 1000(0hm)。

勾选：Probe voltage 和 Probe current。

Label：C2_Z30，如图 8-49 所示。

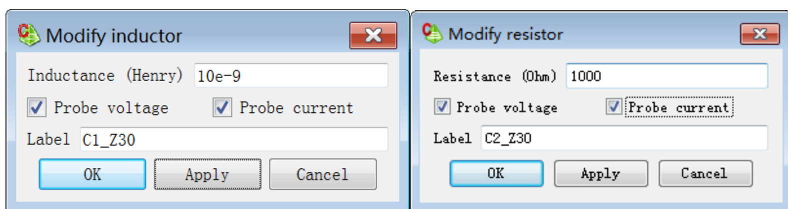


图 8-49　定义电感 C1_Z30 和接地大电阻 C2_Z30

在 C2 端的 MyPin3 与地符号之间跨接该电阻，如图 8-50 所示。

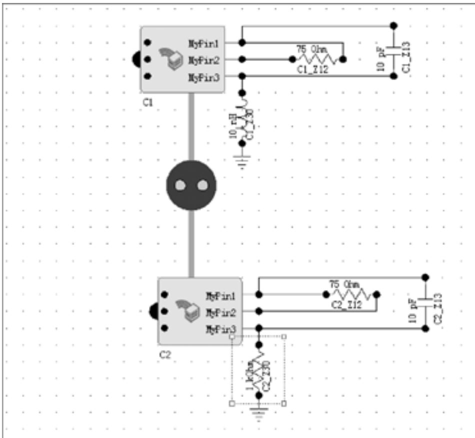


图 8-50　在原理图中，连接电阻和电感

（10）激励定义

在视图区域，由“CableHarness1”切换到 3D 视图“3D view1”，在左侧的树形浏览器中，进入“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Plane wave”选项，弹出“Add plane wave source”对话框，进行如下设置。

Direction：（θ：35, φ：30)。

Polarisation：Left hand rotating elliptical。

Ellipticity(0 to 1)：1。

Label：PlaneWaveSource1。

单击“Create”按钮，如图 8-51 所示。

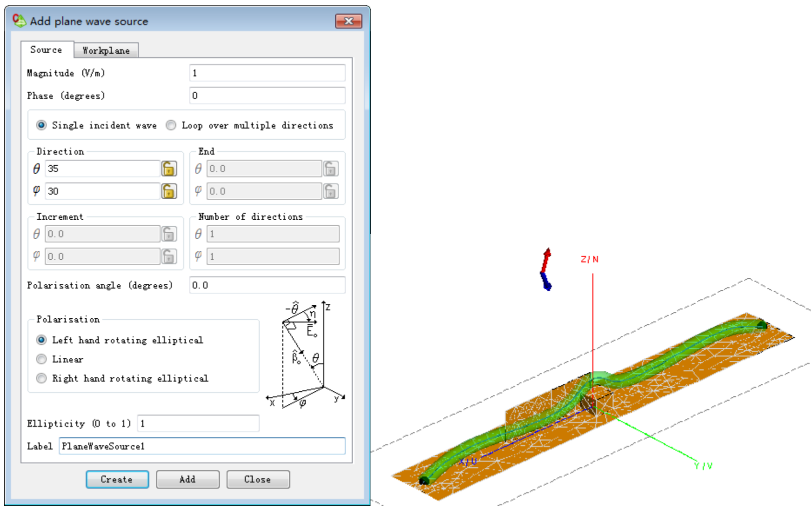


图 8-51　定义平面波激励

（11）求解设置检查

在“Global”结点中，展开“Cable harness”结点，双击已经建立的“CableHarness1”，

弹出“Modify cable harness”对话框，选择“Solution”选项卡，进行如下设置。

Cable coupling properties：Irradiating。

Solution method for outer cable problem(shield/external ground)：Multiconductor transmission line (MTL)。

单击“Cancel”按钮，如图 8-52 所示。

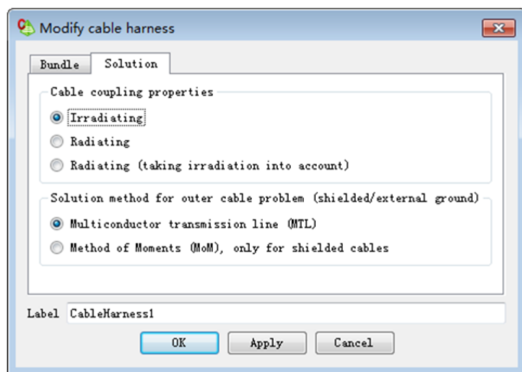


图 8-52　检查线束求解设置选项

（12）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（13）修改方法（重新计算）

在主菜单中，单击“Save as”按钮，把工程另存为“Shielded_Two_Wire_Bench_Irrad_MoM.cfx”。

求解设置修改：在左侧的树形浏览器中，进入“Configuration”选项卡，在“Global”结点中，展开“Cable harness”，双击已经建立的“CableHarness1”，弹出“Modify cable harness”对话框，进入“Solution”选项卡中进行如下设置。

Cable coupling properties：Irradiating。

Solution method for outer cable problem(shielded/external ground)：Method of Moments(MoM),only for shielded cables。

单击“OK”按钮，如图 8-53 所示。

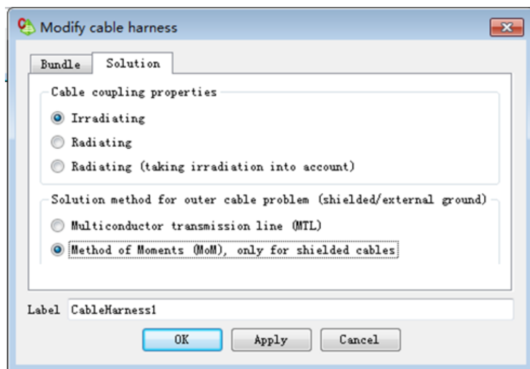


图 8-53　修改线束求解设置选项

在“Home”菜单中，单击“Save”按钮保存该工程。在“Solve/Run”菜单中，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（14）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 2D 结果：在“Home”菜单，单击“Add model”按钮，读入工程文件“Shielded_Two_Wire_Bench_Irrad_MTL.bof”的结果。

在“Home”菜单中单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，在“Probes”下拉按钮“”中，依次单击两个工程中的“C1_Z30”，在右侧的控制面板中进行如下设置。

在“Traces”区域内，同时选中“C1_Z30”和“C1_Z30_1”。

勾选：dB。

单击“Display”菜单，在“Axes”中选择“Log (horizontal)”。

得到的结果显示如图 8-54 所示。

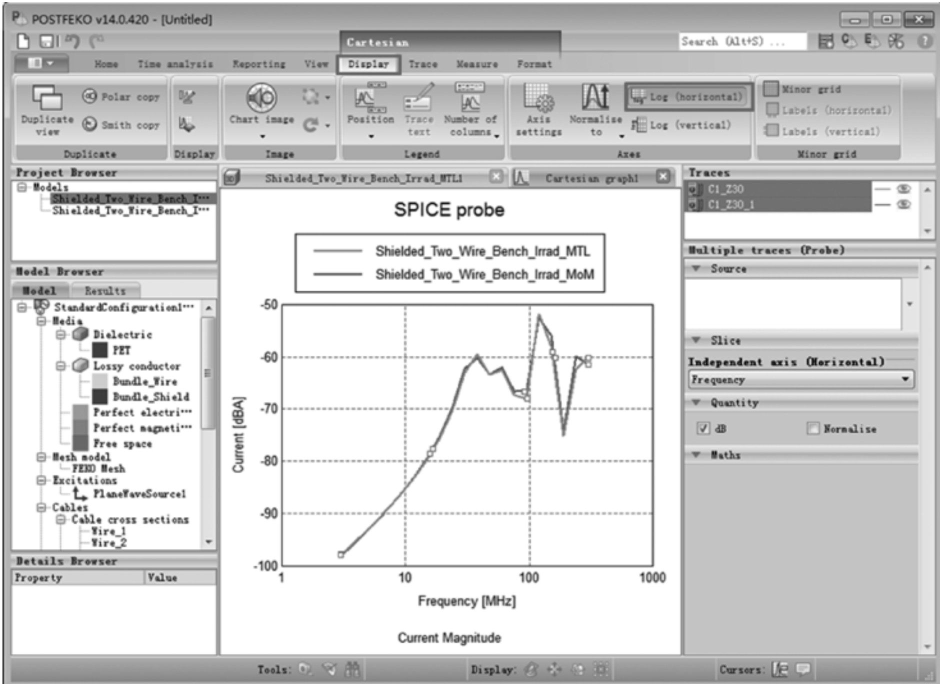


图 8-54　显示 C1_Z30 上的电流

进入“Home”菜单，单击“Save as”按钮，保存计算结果文件为“Compare_Irrad.pfs”，关闭 POSTFEKO。

（15）计算线缆的辐射（修改设置）

返回到 CADFEKO 中，单击“Open model”按钮，打开文件“*Shielded_Two_Wire_Bench_Irrad_MTL.cfx*”。

单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“*Shielded_Two_Wire_Bench_Irrad_MTL*.cfx”另

存为“*Shielded_Two_Wire_Bench_Rad_MTL*.cfx”。

删除激励源：在左侧的树形浏览器中，选择“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，选中“Sources”结点中的“PlaneWaveSource1”，删除该激励源。

修改求解设置：在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中，展开“Global”结点，展开“Cable harness”，双击已经建立的“CableHarness1”，弹出“Modify cable harness”对话框，进入“Solution”选项卡，进行如下设置。

Cable coupling properties：Radiating。

Solution method for outer cable problem(shielded/external ground)：Multiconductor transmission line (MTL)。

单击“OK”按钮，如图 8-55 所示。

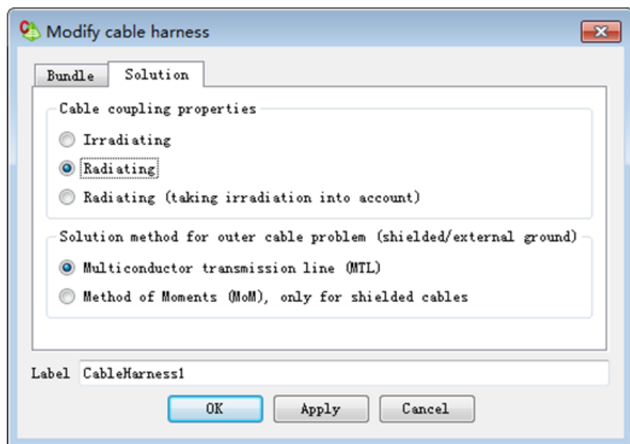


图 8-55　修改线束求解设置选项

（16）添加线缆的激励

进入到“CableHarness1”视图中，进入“Cable Schematic”菜单，单击“Voltage source”按钮，自动添加该电压源到原理图中，双击该电压源符号，弹出“Modify voltage source”对话框，进行如下设置。

Label：C1_V12。

单击“OK”按钮，如图 8-56 所示。

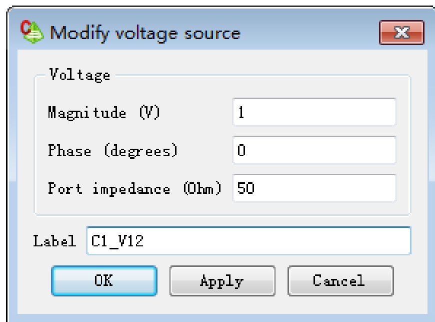


图 8-56　设置电压源激励

删除 C1_Z12 与 C1 端 MyPin1 之间的连线，把 C1_V12 电压源跨接在 C1 端的 MyPin1 与 C1_Z12 之间，如图 8-57 所示。

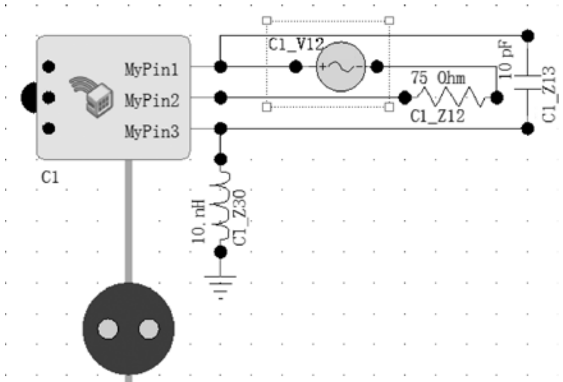


图 8-57 添加电压源激励

（17）添加场求解设置

由“Cableharness1”切换到“3D View1”中，在左侧的树形浏览器中，选择“Configuration”选项卡，展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Near fields”选项，弹出“Request near fields”对话框，进行如下设置。

Definition methods：Spherical。选择“Specity increments”

Start：(*r*：300; *θ*：0.0; *φ*：0.0)。

End：(*r*：300; *θ*：90; *φ*：360)。

Increment：(*r*：0; *θ*：5; *φ*：5)。

Label：nf_3m。

单击“Create”按钮，如图 8-58 所示。

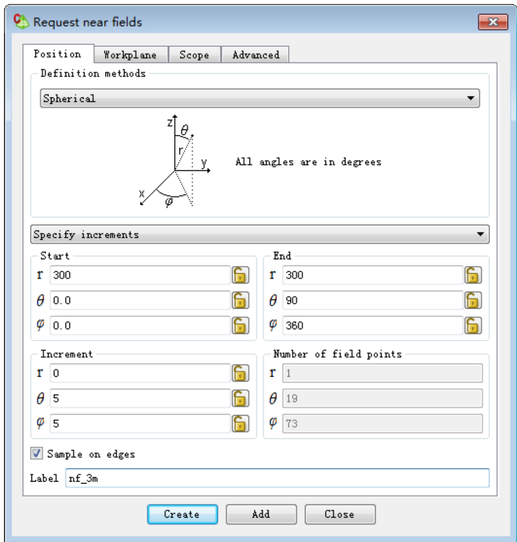


图 8-58 定义近场区域

（18）网格划分

进入“Mesh”菜单，单击“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，采用默认设置，重新生成网格。

（19）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（20）修正设置

单击起始菜单中的“Save as”按钮，把当前工程另存为“Shielded_Two_Wire_Bench_Rad_MoM.cfx”。

在左侧的树形浏览器中进入“Configuration”选项卡，展开“Global”→“Cable harness”结点，双击已经建立的“CableHarness1”，弹出“Modify cable harness”对话框，进入“Solution”选项卡，进行如下设置。

Solution method for outer cable problem(shielded/external ground)：Method of Moments(MoM), only for shielded cables。

单击“OK”按钮，如图 8-59 所示。

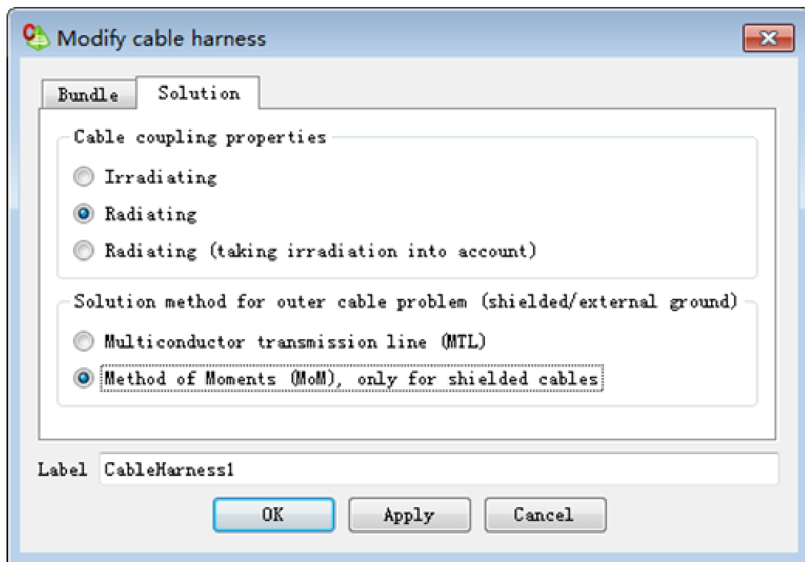


图 8-59 修改线束求解设置选项

（21）提交计算

在“Home”菜单中，单击“Save”按钮，保存当前工程；进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（22）结果显示

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中单击“Near field”按钮下的“nf_3m”，在右侧的控制面板中进行如下设置。

Frequency：30MHz。

勾选：dB。

进入“Result”菜单，选择“Show Contours”以显示等值线，如图 8-60 所示。

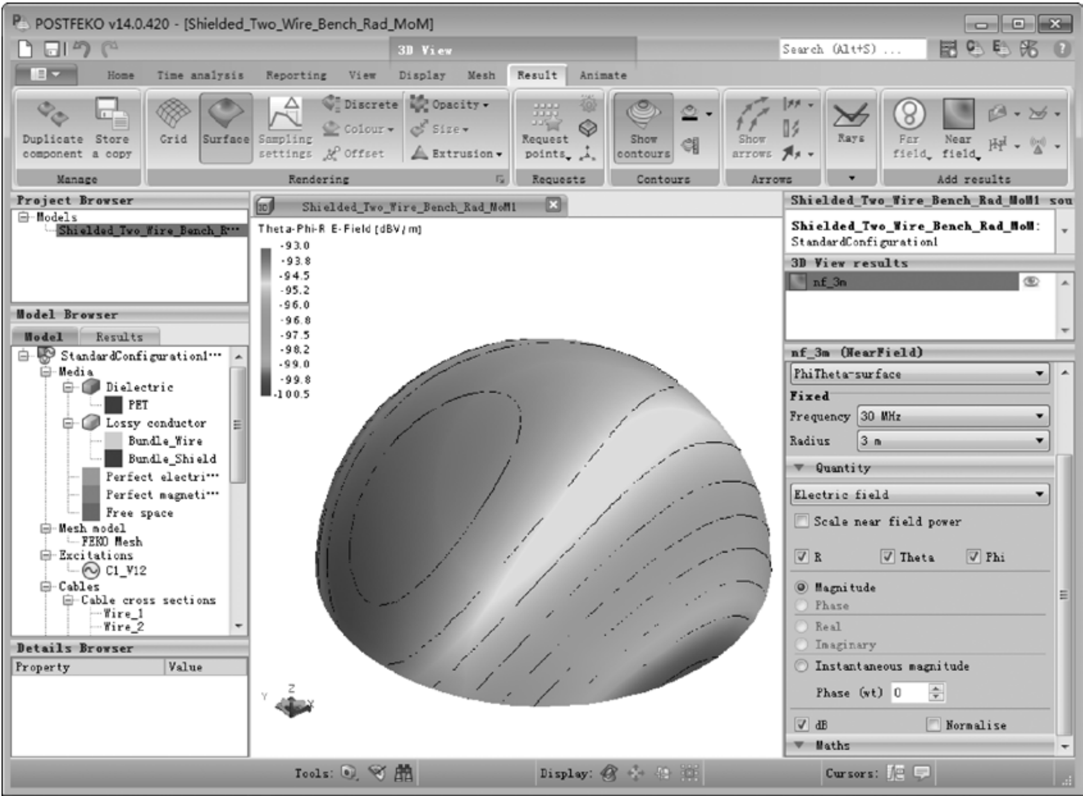


图 8-60　设置 3D 显示方式

显示 2D 结果：切换到“Home”菜单，单击“Add model”按钮，读入工程文件“Shielded_Two_Wire_ Bench_Irrad_MTL.bof”的结果。

单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，依次单击两个工程中的“Source data”→“C1_V12”，在右侧的控制面板中进行如下设置。

在“Traces”区域内，依次选择“C1_V12”和“C1_V12_1”进行如下设置。

Quantity：Reflection coefficient。

勾选：Use custom reference impedance。

Reference impedance：75。

勾选：Subtract loading。

Impedance：75。

勾选：dB。

在右侧的控制面板中，为每一个曲线的反射系数设定如下，如图 8-61 所示。

Reference impedance：75 Ohm。

Subtract loading：75 Ohm。

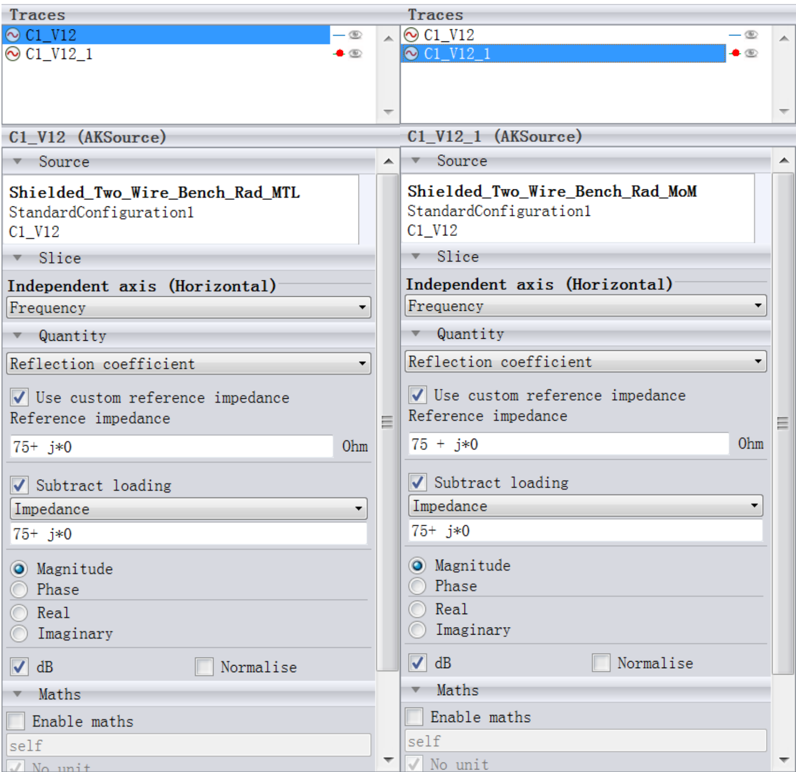


图 8-61　反射系数详细设置

在右侧控制面板中的“Traces”区域内，同时选中“C1_V12”和“C1_V12_1”，进入“Display”菜单，单击“Log(Horizontal)”，结果显示如图 8-62 所示。

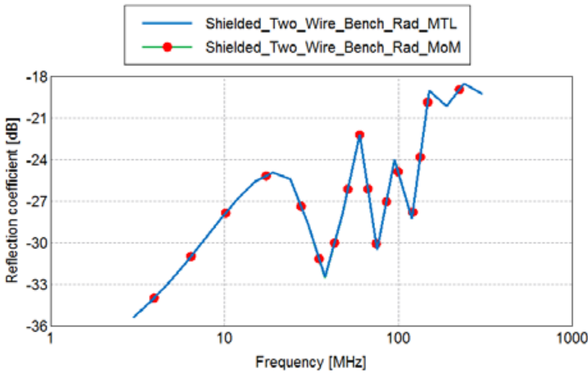


图 8-62　显示反射系数

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“Compare_Rad.pfs”，关闭 POSTFEKO。

第 9 章

工程仿真案例 5——电磁散射



复杂三维目标电磁散射特性研究在国防、航空、航天、舰船等领域均具有重要应用。例如，在雷达系统设计与雷达目标识别、目标隐身与反隐身、作战仿真等工程方面有着广泛的应用。目标电磁散射特性的获得有测量和计算两种方法。测量法是在微波暗室或实际场地对目标散射场测量。计算方法可分为数值方法和高频近似方法。由于雷达工作在微波频段、常见目标外形复杂、电尺寸超大，因此这些特点都增加了计算方法分析的复杂度。FEKO 软件以矩量法为基础，采用多层快速多极子方法提高计算规模及计算效率。另外，FEKO 中包含多种高频近似方法以及各类混合算法，可完成对复杂目标电磁散射的快速计算和评估。本章将详细介绍应用 FEKO 软件进行电磁散射分析的具体操作和流程。

9.1　电磁散射单站与双站 RCS
9.2　FEKO 典型目标体的仿真应用

9.1 电磁散射单站与双站RCS

物体被电磁波照射，能量向各个方向分布称为电磁散射，物体本身通常称作目标或散射体。返回到波源方向的散射能量（后向散射）形成物体的雷达回波。目标回波的强度及电磁散射特性通常以雷达散射截面（Radar Cross Section，RCS）表征。RCS 是雷达隐身技术中的关键概念，它表征了目标在雷达波照射下所产生回波强度的一种物理量。

对于幅度为$\boldsymbol{E}_0$的平面波，其功率密度为

$$S_{\mathrm{i}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\boldsymbol{E}_0|^2}{Z_{\mathrm{F0}}} \tag{9-1}$$

式中，Z_{F0}为电磁波所在介质的波阻抗。散射场的功率密度为

$$S_{\mathrm{s}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\boldsymbol{E}_\vartheta|^2 + |\boldsymbol{E}_\varphi|^2}{Z_{\mathrm{F0}}} \tag{9-2}$$

则雷达散射截面 RCS 定义为

$$\sigma_{\mathrm{Total}} = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{S_{\mathrm{s}}}{S_{\mathrm{i}}} = \lim_{R\to\infty} 4\pi \frac{|R\boldsymbol{E}_\vartheta|^2 + |R\boldsymbol{E}_\varphi|^2}{|\boldsymbol{E}_0|^2} = 4\pi \frac{|\boldsymbol{E}_{\mathrm{far},\vartheta}|^2 + |\boldsymbol{E}_{\mathrm{far},\varphi}|^2}{|\boldsymbol{E}_0|^2} \tag{9-3}$$

$$\sigma_{\mathrm{Horizontal}} = \lim_{R\to\infty} 4\pi \frac{|R\boldsymbol{E}_\varphi|^2}{|\boldsymbol{E}_0|^2} = 4\pi \frac{|\boldsymbol{E}_{\mathrm{far},\varphi}|^2}{|\boldsymbol{E}_0|^2} \tag{9-4}$$

$$\sigma_{\mathrm{Vertical}} = \lim_{R\to\infty} 4\pi \frac{|R\boldsymbol{E}_\vartheta|^2}{|\boldsymbol{E}_0|^2} = 4\pi \frac{|\boldsymbol{E}_{\mathrm{far},\vartheta}|^2}{|\boldsymbol{E}_0|^2} \tag{9-5}$$

式中，$\sigma_{\mathrm{Horizontal}}$和$\sigma_{\mathrm{Vertical}}$分别为散射场$\varphi$分量和$\vartheta$分量对应的 RCS。

通常影响目标 RCS 的因素包括：目标材料的电性能、目标的几何外形、目标被雷达波照射的方位、入射波频率、入射场极化形式和接收天线的极化形式。另外，根据问题的类型，RCS 有以下不同工况：

（1）单站与双站

RCS 分为单站（见图 9-1）和双站（见图 9-2）两种类型，所谓单站 RCS 即为发射机与接收机为同一部雷达，双站 RCS 则为一发一收，分别用不同的雷达。

测试上，单站的更容易，只需要一部雷达即可，所以测试数据一般为单站。

数值仿真由于需要构建并求解一个线性方程组，一个激励对应一个右端向量，因此在计算上，双站 RCS 更容易。FEKO 软件中矩量法（MoM）以及高阶矩量法（HOBF）方法计算双站 RCS 和单站 RCS 均只需要求解一次矩阵。对于单站 RCS，不同入射角度只需根据矩阵的 LU 分解及右端向量即可快速得到目标的单站 RCS。例如，采用多层快速多极子（MLFMM）方法计算目标单站 RCS 需要每个角度均采用迭代方法求解。

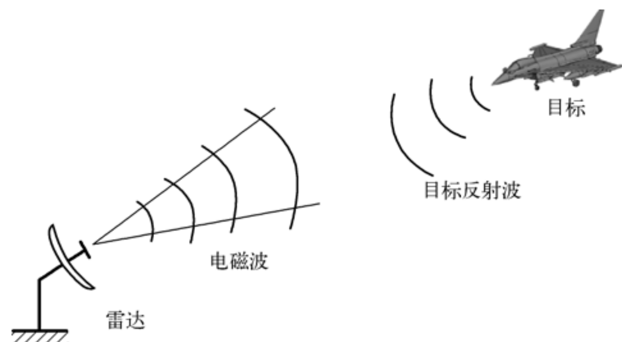


图 9-1　飞行器单站 RCS

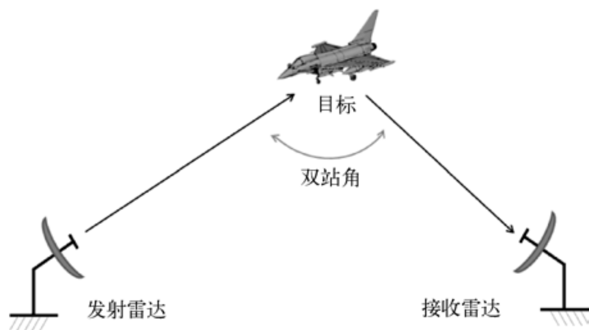


图 9-2　飞行器双站 RCS

（2）极化

极化的含义为入射电磁波的电场方向与扫描面的夹角。根据扫描面的不同，通常分为水平极化和垂直极化，此处垂直和水平的含义都是相对于扫描平面而言的。

（3）电小尺寸与电大尺寸

以入射电磁波波长计算的模型尺度称为电尺寸。当模型的电尺寸较小（小于几个或几十个波长）时，通常属于电小问题，反之属于电大问题。

为了计算 RCS，发展了一系列的计算方法，通常可分为：

1）解析方法。典型方法如 MIE 级数方法。

2）积分方程方法。矩量法（MoM）及其快速算法（高阶矩量法、FMM、MLFMM 等）。

3）微分方程方法。有限元（FEM）、时域有限差分（FDTD）。

4）高频方法。物理光学（PO）、几何光学（GO）、几何绕射理论（UTD）等。

解析方法只能处理极少数规则问题。传统的积分方程方法和微分方程方法可处理电小和中等电尺寸的问题，其中对于 RCS 问题，MOM 及其快速算法（FMM、MLFMM 等）精度高、未知量少，成为这一类方法的首选。高频方法适用于电尺寸特别巨大的问题，以有限的计算资源换取对工程设计有指导意义的结果。

应用 FEKO 软件计算目标的 RCS，仿真流程如下：

1）设定常用参数，如工作频率、工作波长、材料参数、几何参数等。

2）模型的创建（复杂目标体模型可通过 CAD 接口导入），也可以直接导入模型的网格

文件。

3）材料的设定，可以在材料库中进行选择。

4）定义平面波。图 9-3 所示为 FEKO 中平面波的定义。

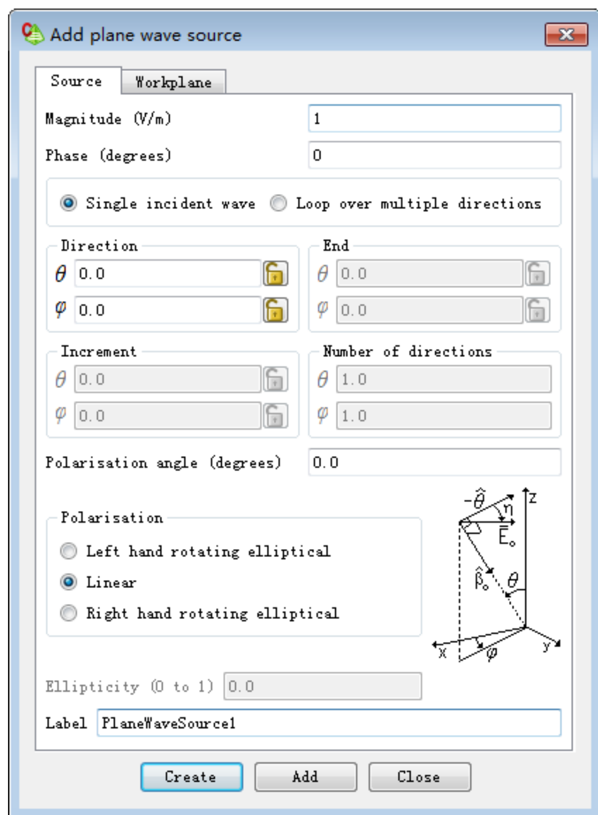


图 9-3　FEKO 中平面波的定义

“Add plane wave source”对话框中各参数含义介绍如下。

- “Single incident wave”为定义平面波只有一个入射方向，通常用于双站 RCS 计算。
- “Loop over multiple directions”为定义平面波多个入射方向，通常用于单站 RCS 计算。
- “Direction”与“Increment”定义入射方向和多个入射方向的步进角度。
- “Polarisation angle (degrees)”定义极化角度，指电场方向，0°时电场在入射平面内，90°时电场垂直于入射平面。
- “Polarisation”定义平面波的极化形式。

5）定义网格划分标准，进行网格划分，生成计算模型。

6）设定计算的参数“far fields”，如图 9-4 所示。

“Request far fields”对话框中各参数的含义介绍如下。

“Calculate fields as specified”为定义散射场，通常用于双站 RCS 计算。

“Calculate fields in plane wave incident direction”为只计算来波方向散射场，通常用于单站 RCS 计算。

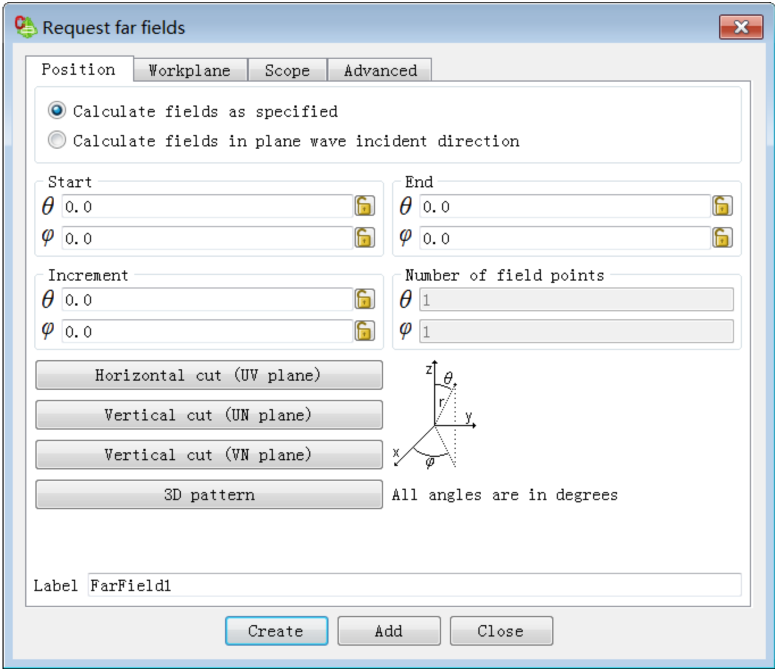


图 9-4 FEKO 中定义求解远场“far fields”

7）选择计算方法（矩量法、多层快速多极子、混合方法等），提交计算任务。

8）计算完成后，在后处理模块（POSTFEKO）中显示计算结果，得到单站 RCS、双站 RCS、散射电流值，并生成计算报告。

9.2 FEKO典型目标体的仿真应用

9.2.1 金属球锥体的单站RCS计算

本节以金属球锥体以及介质金属混合体为例介绍 FEKO 中 RCS 的计算方法和流程。

1. 模型描述

带缝隙球锥体的全模型示意图如图 9-5 所示。

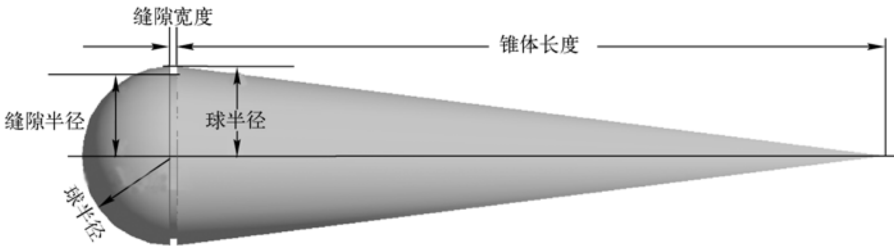


图 9-5 带缝隙球锥体的全模型示意图

2. 计算方法

当工作频率为 3GHz 时，分别采用 MoM+电对称和 MLFMM 方法。

采用多层快速多极子方法，因为满足金属封闭体，所以可以采用 CFIE 方法。

水平极化状态下，分别采用 MoM+磁对称与高阶矩量法；

3. 计算工况

计算该金属目标体的单站 RCS；

垂直极化（VV）与水平极化（HH）

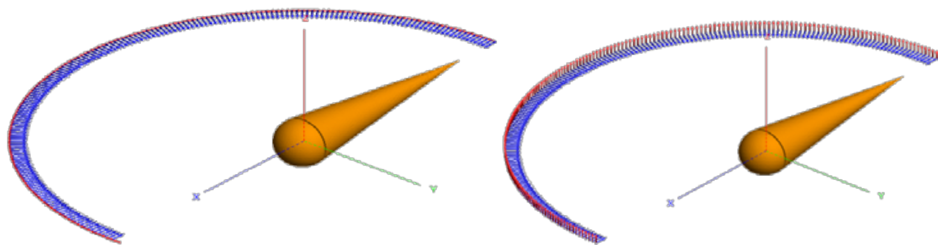


图 9-6　极化方式-水平极化 HH（左图）与垂直极化 VV（右图）

下面采用矩量法计算。

启动 CADFEKO，新建一个工程：cone_sphere_gap_vv_3GHz_mom.cfx。［完整的工程文件参见.../chapter09/app1/completed/cone_sphere_gap_vv_3GHz_mom.cfx，包含变量定义的工程可以参考.../chapter09/app1/started/cone_sphere_gap_vv_3GHz_mom.cfx］

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=3e9。

长度缩放系数：in2m =0.0254。

工作波长：lam0 = c0/freq。

圆锥体长度：cone_length=23.821*in2m。

缝隙长度：gap_length=0.25*in2m。

缝隙半径：gap_radius=2.697*in2m。

球体部分半径：sphere_radius=2.947*in2m。

网格剖分尺寸：mesh=lam0/10，如图 9-7 所示。

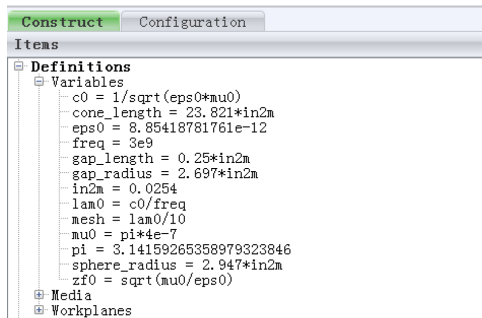


图 9-7　定义变量

（2）定义相对工作坐标系

在树形浏览器中，双击“Workplanes”结点，或直接按〈F9〉键，弹出“Create workplane”对话框，进行如下设置。

U vector：（X：0.0；Y：0.0；Z：−1）。

Label：Workplane1。

单击“Create”按钮，如图 9-8 所示。

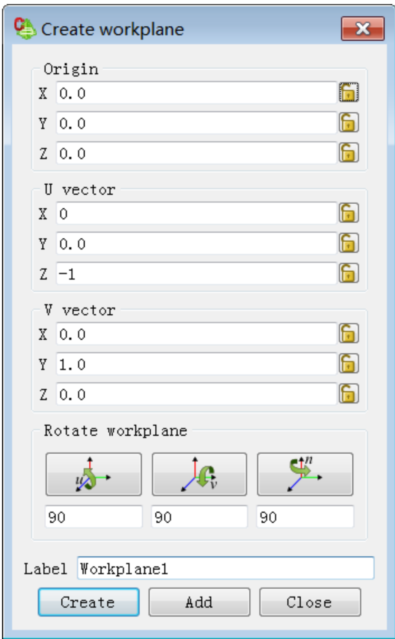


图 9-8　定义工作平面 workplane1

在左侧的树形浏览器中，展开“Workplanes”结点，可以看到已经定义的“Workplane1”，选中“Workplane1”并单击鼠标右键，选择“Set as default”选项，如图 9-9 所示。

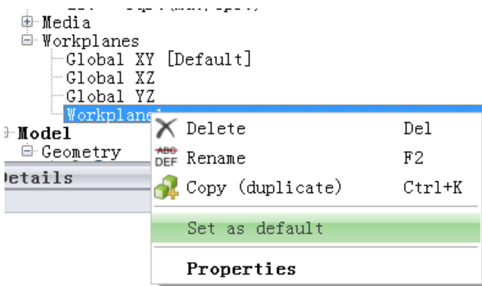


图 9-9　设定“Workplane1”为默认工作坐标系

（3）模型建立

单击“Construct”菜单中的“Cone”按钮，弹出“Create cone”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Base Centre(B)：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Base radius (Rb)：sphere_radius。

Height(H)：−cone_length。

Top radius(Rt)：0.0。

Label：Cone1。

单击“Create”按钮，如图 9-10 所示。

单击“Construct”菜单中的“Cylinder”按钮，弹出“Create cylinder”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Base Centre(B)：（U：0.0, V：0.0, N：0.0）。

Radius(R)：gap_radius。

Height(H)：gap_length。

Label：Cylinder1。

单击“Create”按钮，如图 9-11 所示。

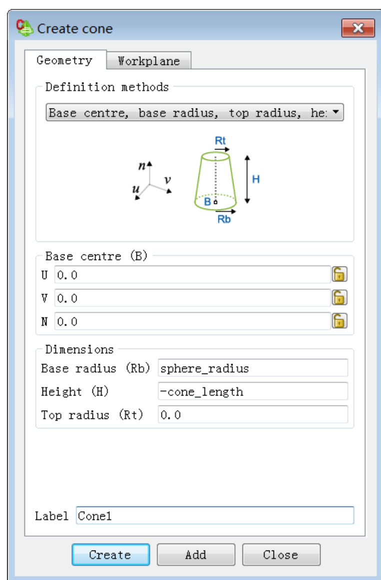


图 9-10　定义圆锥体部分

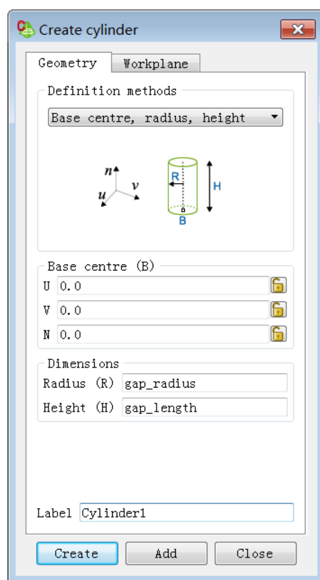


图 9-11　定义圆柱体部分

单击“Construct”菜单中的“Sphere”按钮，弹出“Create sphere”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Centre：（U：0.0, V：0.0, N：gap_length）。

Radius：gap_radius。

Label：Sphere1。

单击“Create”按钮，如图 9-12 所示。

在左侧的树形浏览器中展开“Model”→“Geometry”结点，选中新建的“Sphere1”体模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Split”选项，弹出“Split”对话框，进行如下设置。

Origin：（U：0.0, V：0.0, N：gap_length）。

Plane：UV。

单击“Create”按钮，如图 9-13 所示。模型“Sphere1”被分割成了两部分：“Split_back1”和“Split_front1”。选中“Split_back1”（确认删除的为与圆锥和圆柱重叠的部分），按〈Delete〉键，删除该模型；选中“Split_front1”，按〈F2〉键，把该模型更名为“Sphere1”。

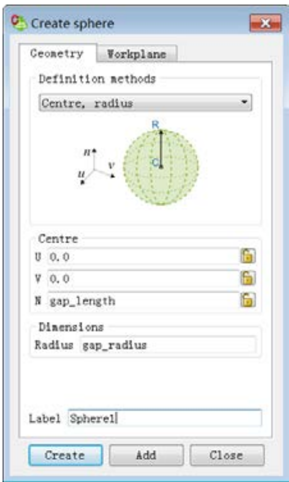


图 9-12　定义球体部分

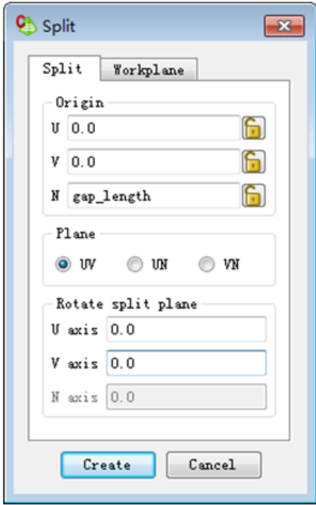


图 9-13　切割球体

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，选中新生成的所有模型“Cone1”“Cylinder1”“Sphere1”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“cone_sphere_with_gap”。选中该模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simplify”选项，弹出“Simplify geometry”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮（目的是为了删除球体与圆柱以及圆柱与圆锥之间的两个冗余面，如图 9-14 所示，因为这两个面前后的 Region 区域材料相同），如图 9-15 所示。

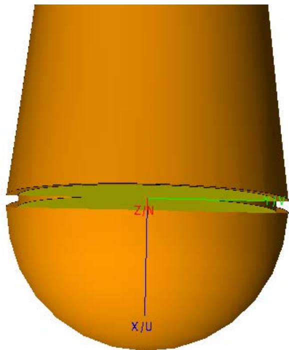


图 9-14　需要删除的冗余面

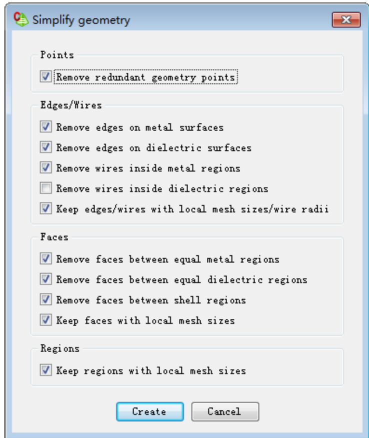


图 9-15　简化模型

（4）设定对称

矩量法（MoM）支持电对称和磁对称，单击“Solve/Run”菜单中的“Symmetry”按钮，弹出“Symmetry definition”对话框，进行如下设置。

X=0 plane：No symmetry。

Y=0 plane：Geometry symmetry。

Z=0 plane：Electric symmetry （Z=0，则平面垂直于入射平面波电场极化方向）。

单击“OK”按钮，如图 9-16 所示。

几何对称、电对称显示如图 9-17 所示。

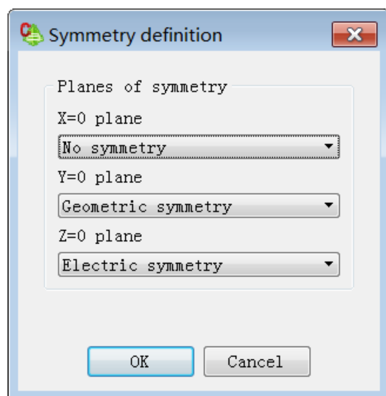


图 9-16　定义对称性

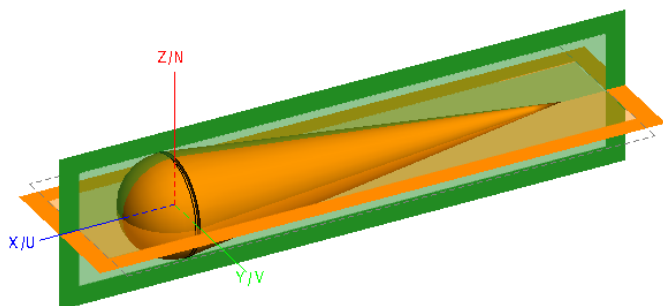


图 9-17　几何对称、电对称显示

（5）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

（6）激励设置

在左侧的树形浏览器中，展开“Workplanes”结点，选中“Global XY”，单击鼠标右键，选择“Set as Default”选项。

在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Plane wave”选项，弹出“Add plane wave excitation”对话框，进行如下设置。

选中：Loop over multiple directions。

Start：(θ：90, φ：−180)。

End：(θ：90, φ：0.0)。

Increment：(θ：0.0, φ：1)。

Polarisation angle(degrees)：0.0。

Polarisation：Linear。

Label：PlaneWave1。

单击“Create”按钮，如图 9-18 所示。

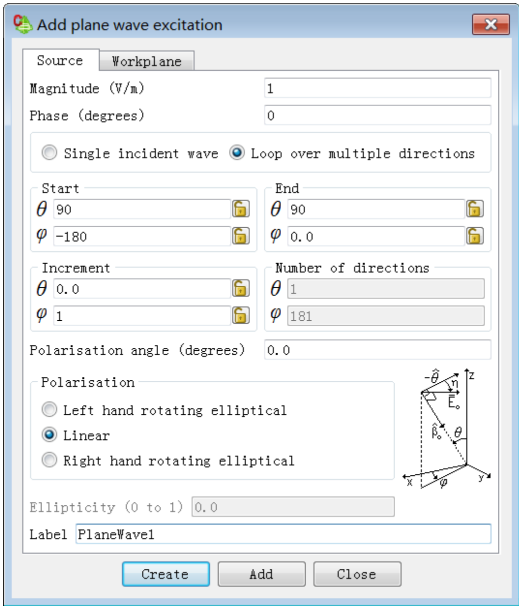


图 9-18　定义入射平面波

（7）求解设置

在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

选中：Calculate fields in plane wave incident direction。

Label：ff_scattering。

单击“Create”按钮，如图 9-19 所示。

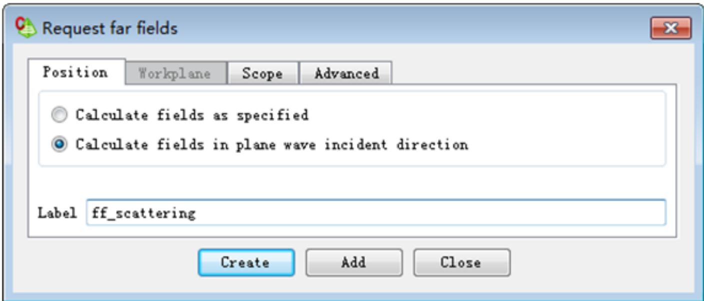


图 9-19　远场方向图求解设置

（8）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangles edge length”：mesh。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 9-20 所示。

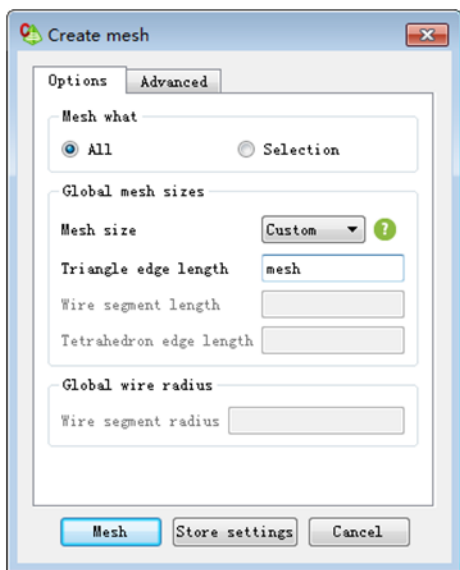


图 9-20　定义网格划分

（9）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（10）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中，单击“Far field”→“ff_scattering”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框，单站 RCS 显示如图 9-21 所示。

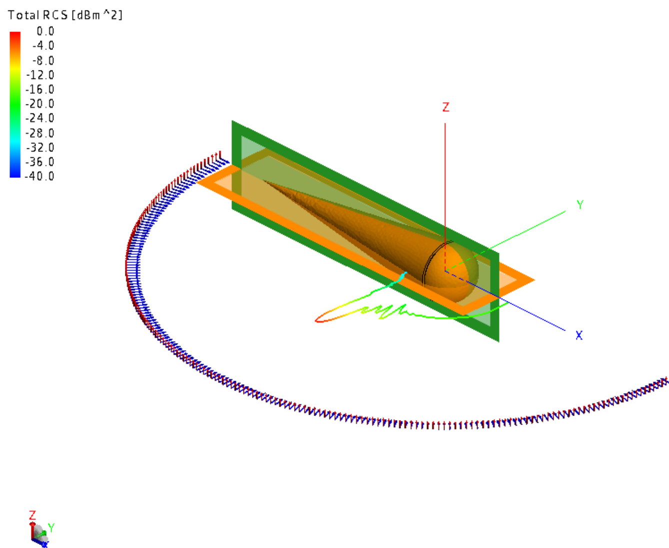


图 9-21　单站 RCS 显示

显示 2D 结果：在“Home”菜单中单击“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Far field”→“ff_scattering”，会在直角坐标系中直接显示 theta 为“90 deg”时极化平面上的 2D 单站 RCS。在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。垂直极化单站 RCS 如图 9-22 所示。

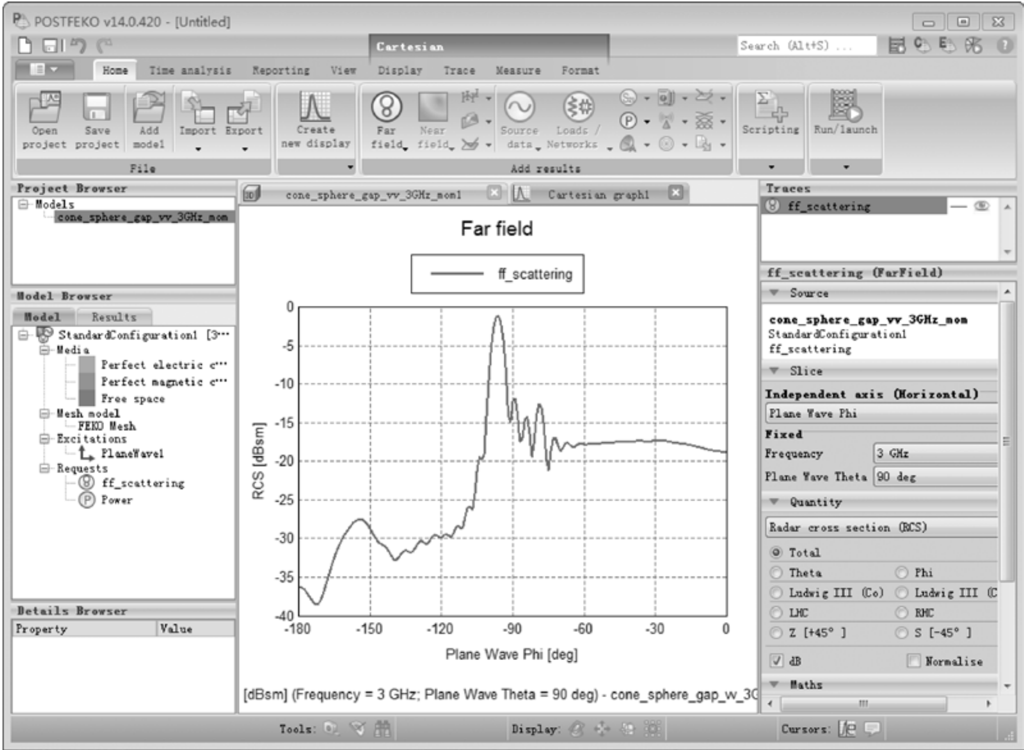


图 9-22　垂直极化单站 RCS

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“cone_sphere_gap_ vv_3GHz_mom.pfs”。不要关闭 POSTFEKO。

下面采用 MLFMM+EFIE 混合方法计算。

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，另存为“cone_sphere_gap_vv_3GHz_MLFMM.cfx”。

（1）求解方法设置

由于 MLFMM 方法不支持电对称和磁对称，因此原来设定的电对称不起作用。

单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，进入“MLFMM/ACA”选项卡，进行如下设置。

勾选：Solve model with the multilevel fast multipole method (MLFMM)。

单击“OK”按钮，如图 9-23 所示。

（2）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

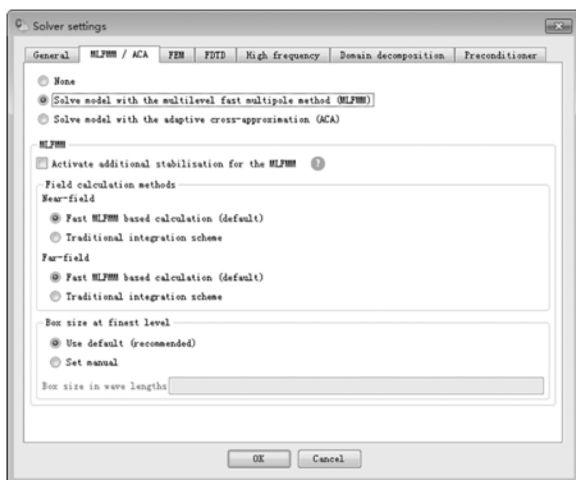


图 9-23　设置计算方法——MLFMM

下面采用 MLFMM+CFIE 混合方法计算。

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“cone_sphere_gap_vv_3GHz_MLFMM.cfx”另存为“cone_sphere_gap_vv_3GHz_MLFMM_CFIE.cfx”。

（1）设定 CFIE

混合积分方程法（CFIE）适用于封闭的金属体，内部填充 Free Space，且所有面元的法向朝外。

首先，检查所有面元的法向是否正确。单击“Display options”菜单中“Colour”按钮下的“Element normal”（即按照法向显示面元的颜色，注意，在默认情况下，是按照面元的材料属性来显示颜色），通过颜色来查看哪些面元的法向不对，在图 9-24 中，在 3D 视图中，选中红色的面元，单击鼠标右键，选择“Reverse normals”选项，可以看到该面元的法向朝外了，即显示为绿色。

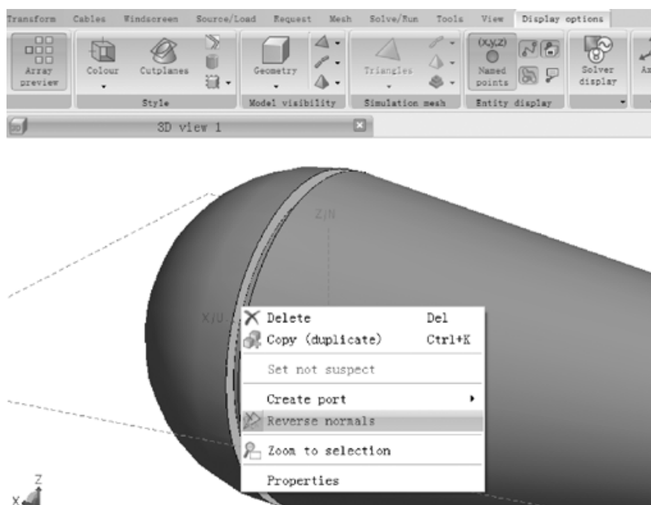


图 9-24　修改面元法向

在左侧的树形浏览器中，切换到“Contruct”选项卡，展开“Model”→“Geometry”结点，选中模型“cone_sphere_gap”，在左下角的“Details”中，展开“Faces”结点，选择所有的面元，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Face properties”对话框，进入“Solution”选项卡，进行如下设置。

“Integral equation”：Combined field。

单击“OK”按钮，如图 9-25 所示。

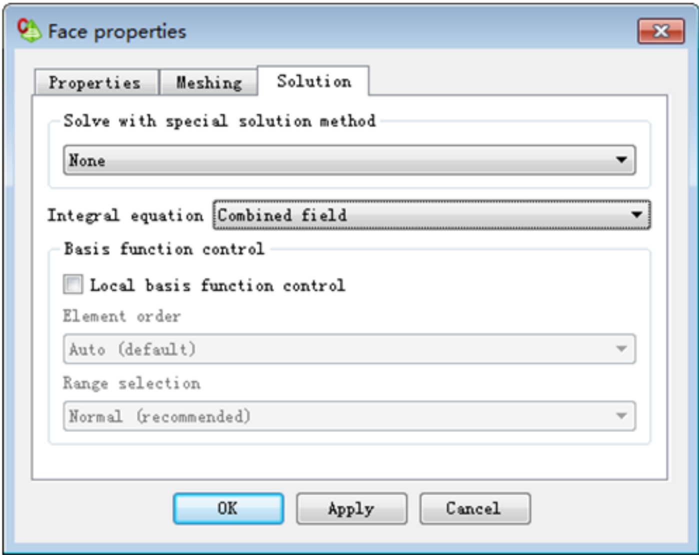


图 9-25　修改面元积分方程方法

在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选择所有的 Region?[Perfect electric conductor]，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Regions properties”对话框（在完成 FEKO 14.0 的更新之后，可以忽略该步操作），在“Properties”选项卡中进行如下设置。

Medium：Free space。

单击“OK”按钮，如图 9-26 所示。

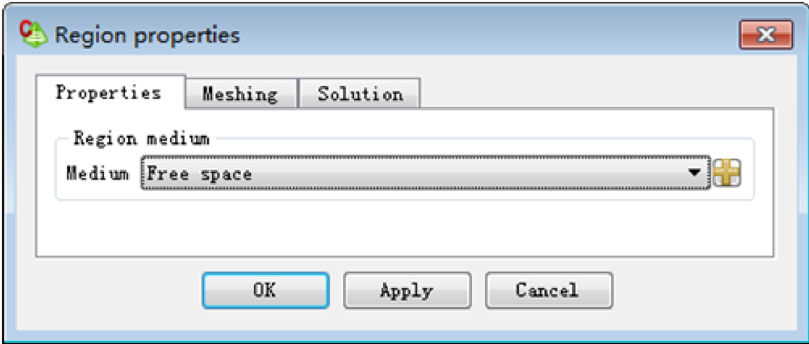


图 9-26　修改球锥体内部材料为“Free Space”

（2）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（3）后处理结果显示

切换到已经打开的后处理界面，单击“Add model”按钮，同时读入文件“cone_sphere_gap_vv_3GHz_MLFMM.bof”和“cone_sphere_gap_vv_3GHz_MLFMM_CFIE.bof”。

在“Home”菜单中，单击“Far field”中新导入的两个工程结果文件中的“ff_scattering”，在右侧的面板中同时选择所有的“Traces”，并勾选“dB”复选框，如图 9-27 所示。

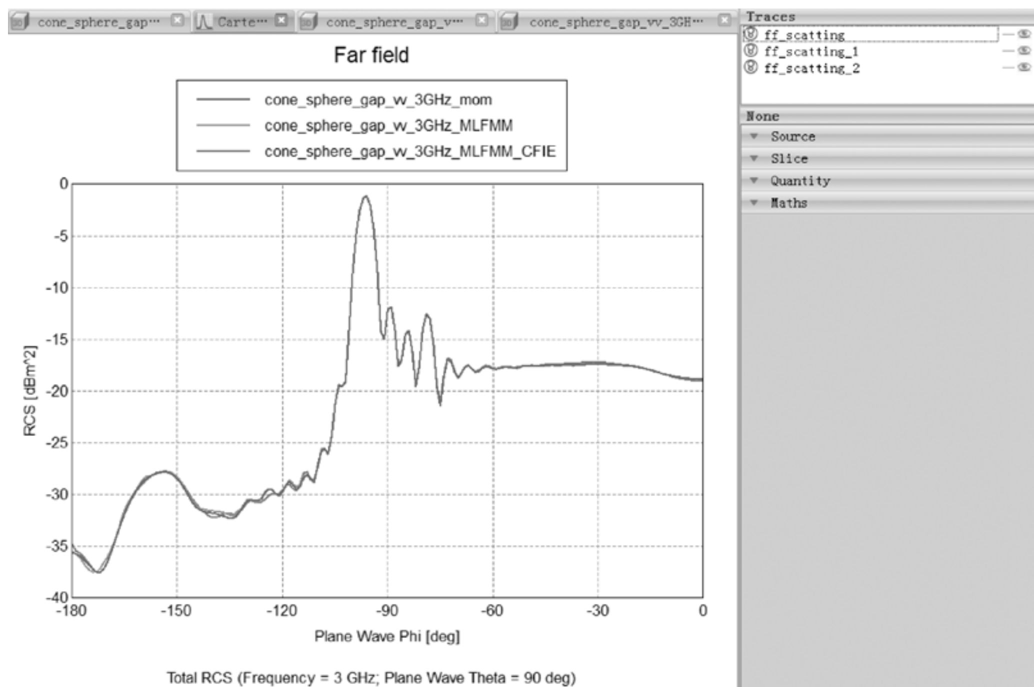


图 9-27　2D 结果显示（MoM+Symmetry、MLFMM+EFIE、MLFMM+CFIE 对比）

在“Home”菜单中单击“Save Project”按钮，保存该工程结果文件为“cone_sphere_gap_vv_3GHz_compare_result.pfs”。退出 POSTFEKO。

下面分析水平极化工况。

返回 CADFEKO，单击“Home”菜单中的“New”按钮，新建一个工程为“cone_sphere_gap_hh_3GHz_mom.cfx”。

完整的工程文件参见“.../chapter09/app1/completed/cone_sphere_gap_hh_3GHz_mom.cfx”，包含变量定义的工程可以参考“.../chapter09/app1/started/cone_sphere_gap_hh_3GHz_mom.cfx]”。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=3e9。

长度缩放系数：in2m =0.0254。

工作波长：lam0 = c0/freq。

圆锥体长度：cone_length=23.821*in2m。

缝隙长度：gap_length=0.25*in2m。

缝隙半径：gap_radius=2.697*in2m。

球体部分半径：sphere_radius=2.947*in2m。

网格剖分尺寸：mesh=lam0/10，如图 9-28 所示。

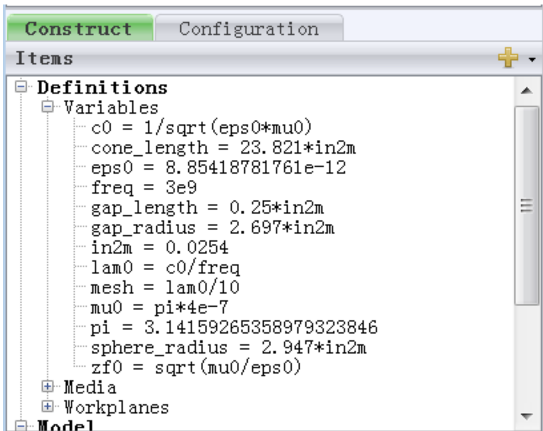


图 9-28　定义变量

（2）创建模型

创建的线（弧线、折线、直线等）的起点和终点会影响扫略出来的面的法向方向。

创建 sphere_path：在“Construct”选项卡中，单击“Create arc”中的“Elliptic arc”，弹出“Create elliptic arc”对话框，进行如下设置。

Centre point(C)：(U：gap_length; V：0.0; N：0.0)。

Radius(Ru)：sphere_radius。

Radius(Rv)：sphere_radius。

Start angle (A0)：0.0。

End angle (A1)：90。

Label：sphere_path。

单击“Create”按钮，如图 9-29 所示。

创建 gap_path：在“Construct”选项卡中，单击“Create curve”中的“Polyline”，弹出“Create polyline”对话框，进行如下设置。

Corner 1：(U：gap_length; V：sphere_radius; N：0)。

Corner 2：(U：gap_length; V：gap_radius; N：0)。

单击“Add”按钮，继续设置。

Corner 3：(U：0; V：gap_radius; N：0)。

单击“Add”按钮，继续设置。

Corner 4：(U：0; V：sphere_radius; N：0)。

Label：gap_path。

单击“Create”按钮，如图 9-30 所示。

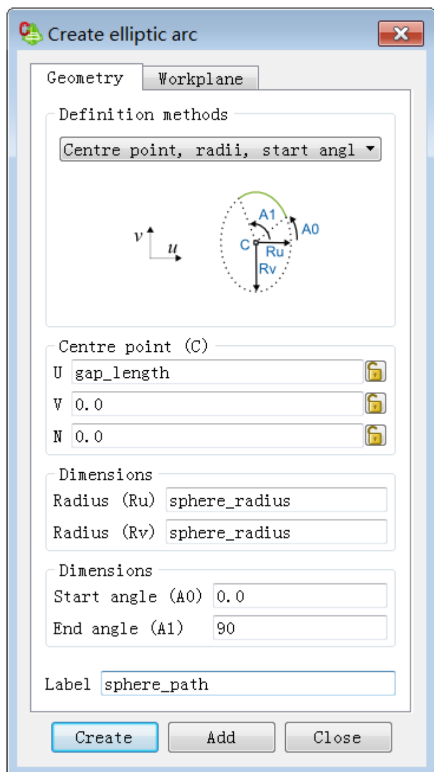


图 9-29 创建球体母线 sphere_path

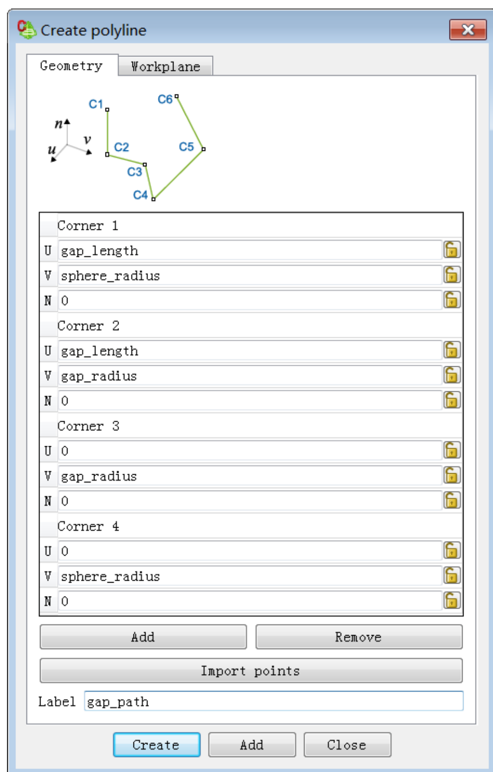


图 9-30 创建缝隙体母线 gap_path

创建 cone_path：在“Construct”选项卡中，单击“Create curve”中的“Line”，弹出“Create line”对话框，进行如下设置。

Start point：(U：0.0; V：sphere_radius; N：0.0)。

End point：(U：−cone_length; V：0; N：0.0)。

Label：cone_path。

单击“Create”按钮，如图 9-31 所示。

在左侧的树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，同时选中所有创建的线模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“base_path”。选中“base_path”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Spin”选项，弹出“Spin geometry”对话框，进行如下设置。

Origin：(U：0.0; V：0.0; N：0.0)。

Axis direction：(U：1; V：0.0; N：0)。

Angle [degrees]：360。

单击“Create”按钮，如图 9-32 所示。

把新生成的模型更名为“cone_sphere_gap”。选中新生成的模型“cone_sphere_gap”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simplify”选项，弹出“Simplify geometry”对话框，确认勾选“Remove edges on metal surfaces”复选框，单击“Create”按钮即可删除母线，如图 9-33 所示。

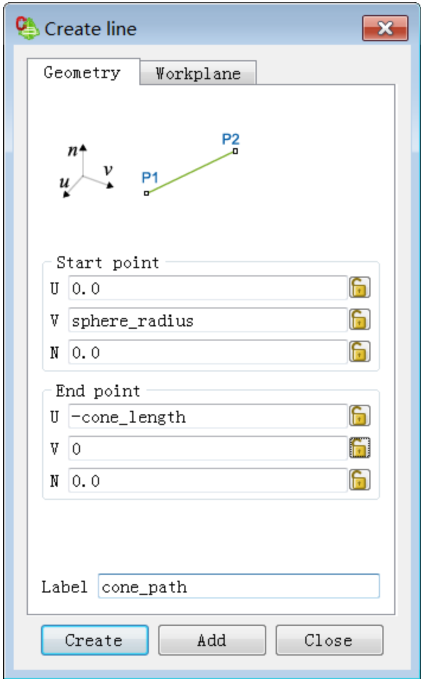


图 9-31　创建圆锥体母线 cone_path

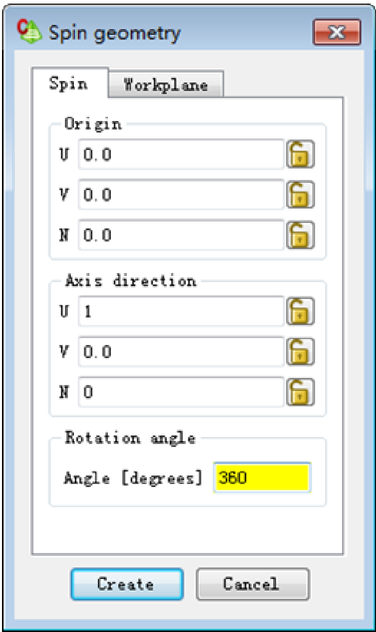


图 9-32　母线绕 X 轴旋转成体（Spin）

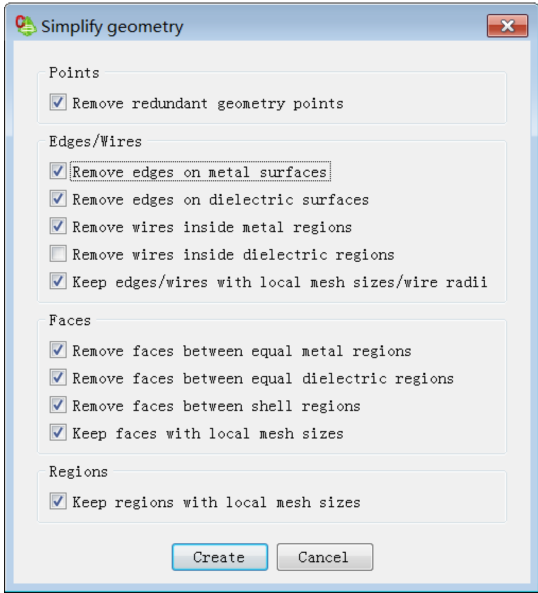


图 9-33　模型简化（删除母线）

（3）设定对称

单击“Solve/Run”菜单中的“Symmetry”按钮，弹出“Symmetry definition”对话框，进行如下设置。

X=0 plane：No symmetry。

Y=0 plane：Geometry symmetry。

Z=0 plane：Magnetic symmetry （Z=0，即平面平行于入射平面波电场极化方向）。

单击“OK”按钮，如图 9-34 所示。

（4）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

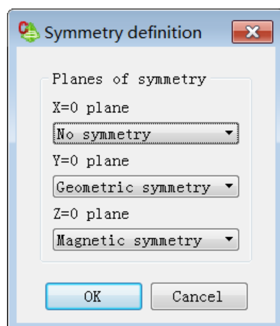


图 9-34 定义对称面——几何对称（Y=0 平面）和磁对称（Z=0 平面）

激励设置：在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Plane wave”选项，弹出“Add plane wave source”对话框，进行如下设置。

选中：Loop over multiple directions。

Start：(θ: 90, φ: −180.0)。

End：(θ: 90, φ: 0.0)。

Increment：(θ: 0.0; φ: 1)。

Polarisation angle(degrees)：90。

Polarisation：Linear。

Label：PlaneWave1。

单击“Create”按钮，如图 9-35 所示。

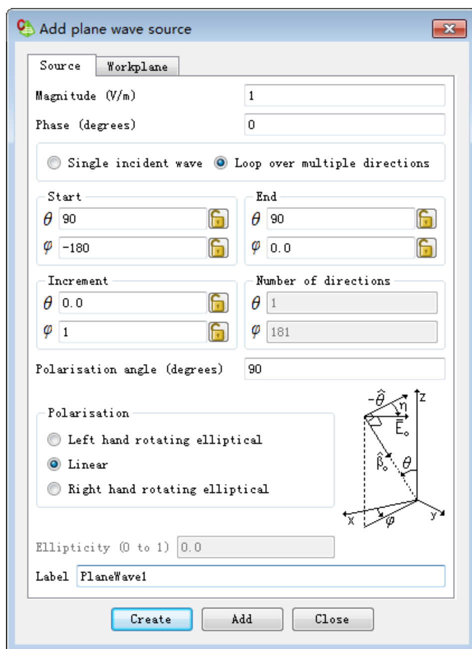


图 9-35 定义入射平面波（水平极化）

求解设置：展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

选中：Calculate fields in plane wave incident direction。

Label：ff_scattering。

单击“Create”按钮，如图 9-36 所示。



图 9-36　远场方向图求解设置

（5）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangles edge length”：mesh。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 9-37 所示。

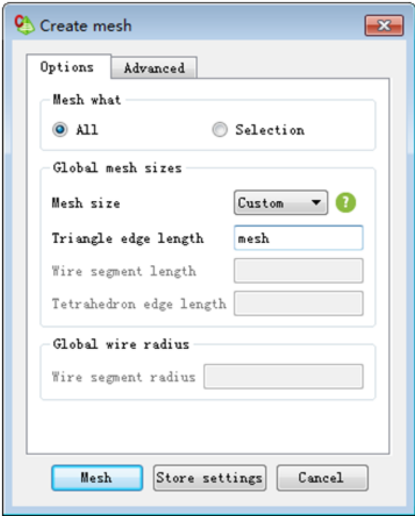


图 9-37　定义网格划分

（6）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（7）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块

POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中，单击“Far field”按钮下的“ff_scattering”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。单站 RCS 显示如图 9-38 所示。

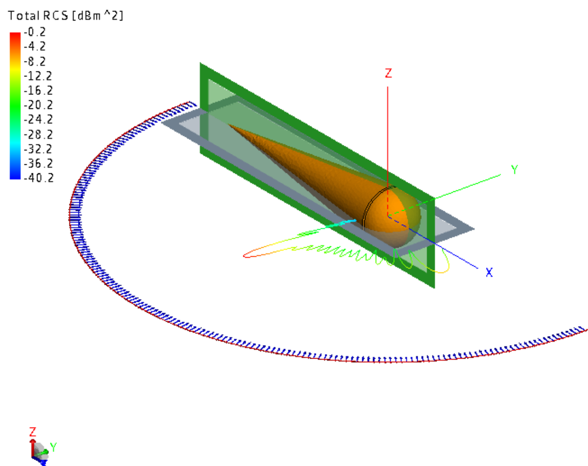


图 9-38　单站 RCS 显示

显示 2D 结果：在“Home”菜单中，单击“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Far field”按钮下的“ff_scattering”，会在直角坐标系中直接显示 theta 为“90 deg”时极化平面上的 2D 单站 RCS。在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。水平极化单站 RCS 如图 9-39 所示。

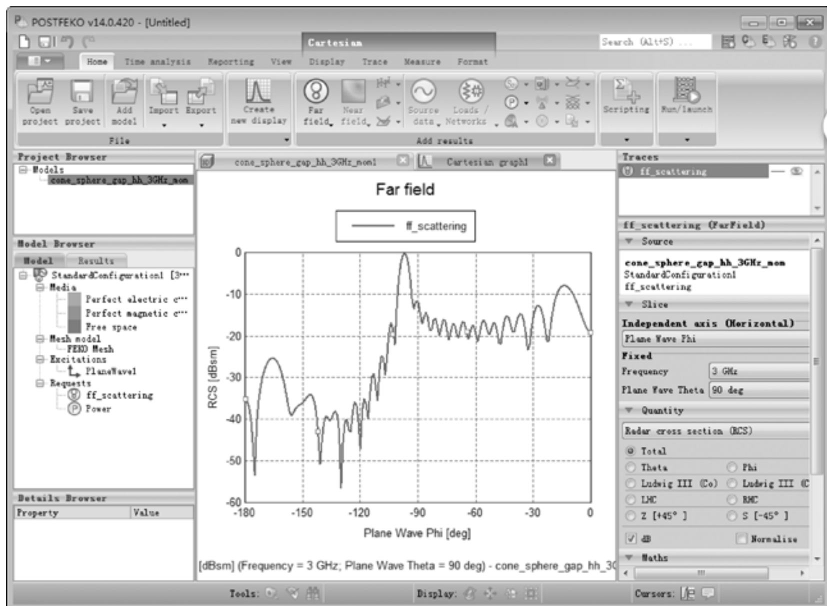


图 9-39　水平极化单站 RCS（直角坐标系）

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“cone_sphere_gap_ hh_3GHz_mom.pfs”。保持 POSTFEKO 处于打开状态。

下面采用高阶矩量法计算。

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，把“cone_sphere_gap_hh_3GHz_mom.cfx”另存为“cone_sphere_gap_hh_3GHz_hobf_mom.cfx”。

（1）设定高阶矩量法

单击“Solve/Run”菜单中的“Solver settings”按钮，弹出“Solver settings”对话框，在“General”选项卡中进行如下设置。

勾选：Solve MoM with higher order basis functions (HOBF)。

Element order：Order=3.5。

单击“OK”按钮，如图 9-40 所示。

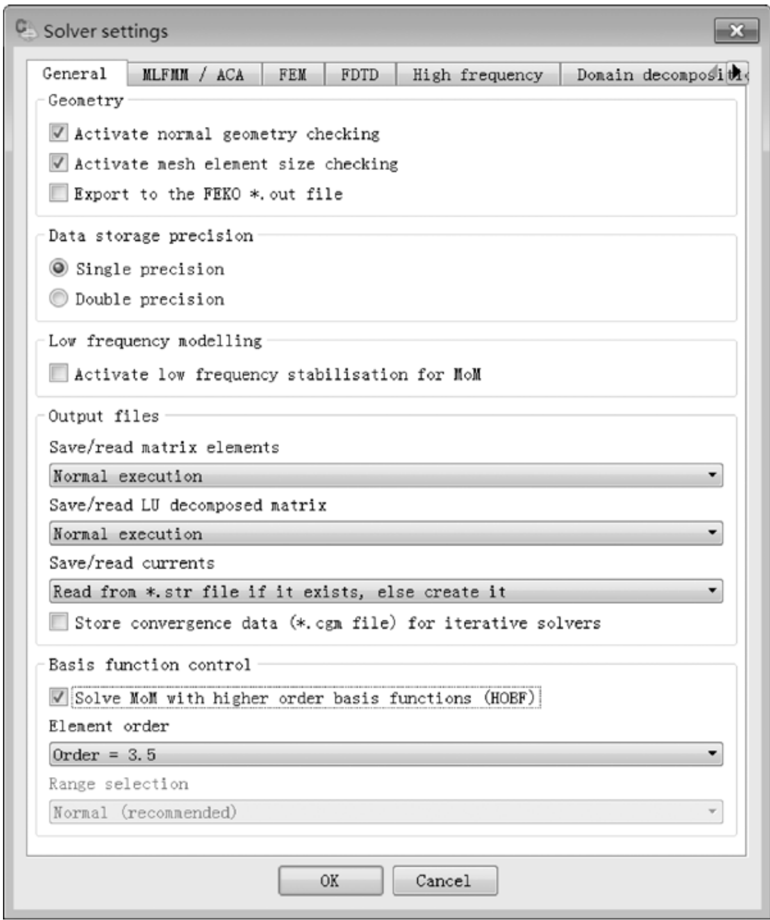


图 9-40　设置计算方法——HOBF

（2）网格划分

修改已经定义的变量：mesh=lam0。

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangles edge length”：mesh。

进入“Advanced”选项卡，继续设置。

调节“Refinement factor”如图 9-41 所示。

调节“Minimum element size”如图 9-41 所示（目的是减少锥体头部的小网格数）。

单击“Mesh”按钮生成网格。

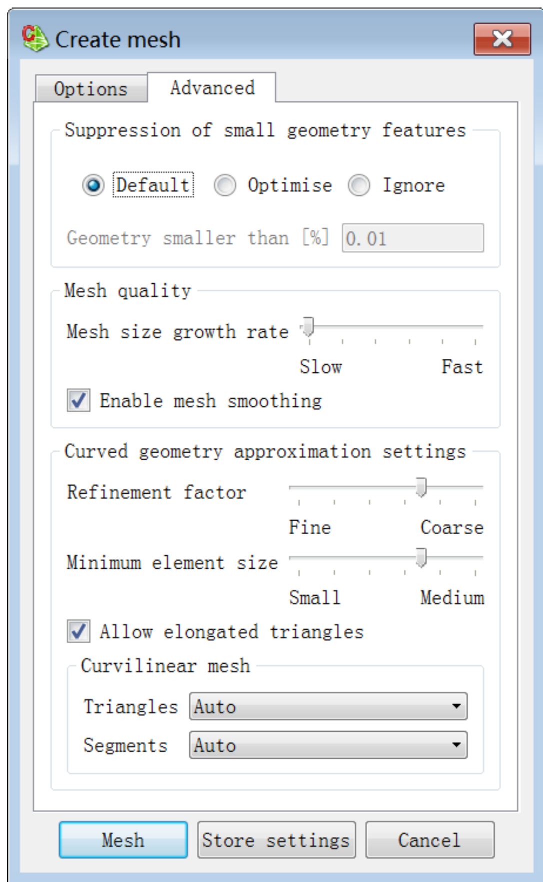


图 9-41 定义网格划分

（3）提交计算

单击“Solve/Run”菜单中的“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（4）后处理结果显示

返回“POSTFEKO”，在“Home”菜单中单击“Add model”按钮，读入工程结果文件“cone_sphere_gap_hh_3GHz_hobf_mom.bof”。进入“Cartesian graph1”视图。

在“Home”菜单中，单击“Far field”按钮下的新导入工程结果文件中“cone_sphere_gap_hh_3GHz_hobf_mom.bof”中的“ff_scattering”，在右侧的面板中同时选择所有的“Traces”，并勾选“dB”复选框。2D 结果显示如图 9-42 所示。

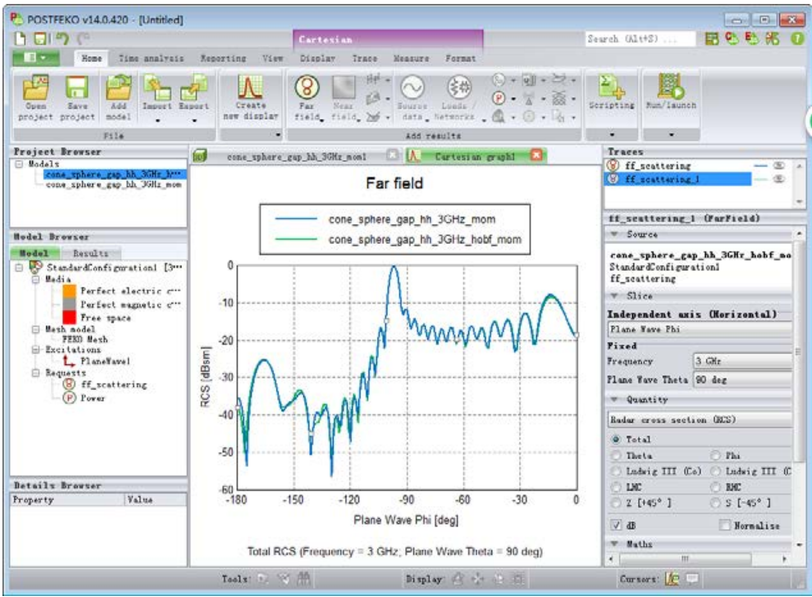


图 9-42　2D 结果显示（MoM+Symmetry 与 HOBF_MoM 的对比）

在“Home”菜单中单击“Save Project”按钮，保存该工程文件为“cone_sphere_gap_hh_3GHz_compare_result.pfs”。

9.2.2 介质金属混合体的单站RCS

为了减少目标体的 RCS，在工程上采用涂敷吸波材料是一种很重要的方法，本节将介绍如何进行有关吸波材料体的 RCS 仿真。

下面介绍一个介质金属混合体的单站 RCS 的计算流程。该模型来源于文献“Iterative solution of a 3-D scattering problem from Arbitary shaped multi dielectric and multi conducting bodies”，IEEE Trans. AP, vol. 42, pp. 954-959, July 1994。

1. 模型描述

复杂材料棱柱体的全模型示意图如图 9-43 所示。

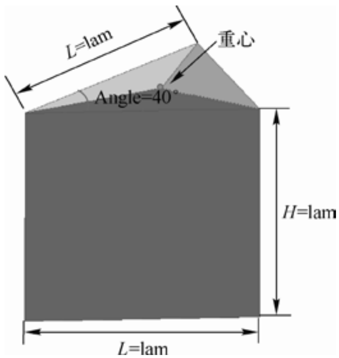


图 9-43　复杂材料棱柱体的全模型示意图

三棱柱模型尺寸如下。

高度：*H*=1 个波长。

边长：*L*=1 个波长。

顶角角度：Angle=40°。

材料分界位置位于三角形的重心。

材料属性如下：

PEC——金色。

Diel_1——绿色。

复数介电常数——4 – j 0.3。

复数磁导率——1.2 – j 0.6。

Diel_2——蓝色。

复数介电常数——1.4 – j 0.7。

2. 计算方法描述

当工作频率为 8.0 GHz 时，分别采用 MoM+SEP 与 MoM+VEP 方法。

3. 计算项目

计算该目标体的单站 RCS 以及垂直极化（VV），如图 9-44 所示。

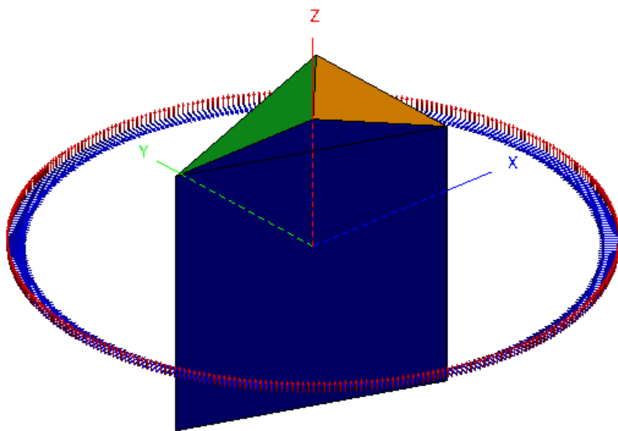


图 9-44　极化方式——垂直极化（VV）

4. 主要流程

启动 CADFEKO，新建一个工程“composed_PEC_Mag_Diel_Prism_monoRCS_mom.cfx”，在以下的各个操作过程中，可以即时保存做过的任何修改（或直接打开“…/chapter09/app2/started/composed_PEC_Mag_Diel_Prism_monoRCS_mom.cfx”，文件中已包含变量的定义，完整的工程文件保存在“…/chapter09/app2/completed/”）。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=8e9。

工作波长：lam = c0/freq。

顶角角度：angle=40。

材料 1 复数相对介电常数（实部）：epsr1_r=4。

材料 1 复数相对介电常数（虚部）：epsr1_i=0.3。

材料 1 复数相对磁导率（实部）：ur1_r=1.2。

材料 1 复数相对介电常数（虚部）：ur1_i=0.6。

材料 1 介质损耗正切：tan1_d=epsr1_i/epsr1_r。

材料 1 磁损耗正切：tan1_u=ur1_i/ur1_r。

材料 2 复数相对介电常数（实部）：epsr2_r=1.4。

材料 2 复数相对介电常数（虚部）：epsr2_i=0.7。

材料 2 介质损耗正切：tan2_d=epsr2_i/epsr2_r，如图 9-45 所示。

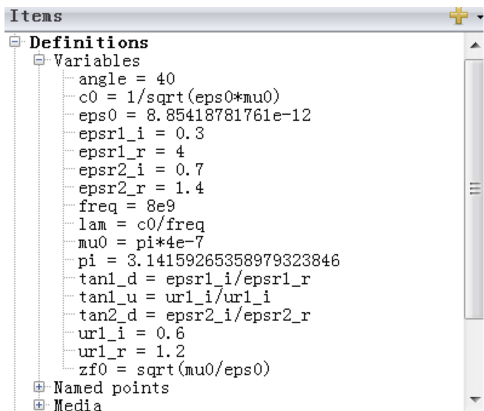


图 9-45　定义变量

（2）定义材料

在树形浏览器中，双击“Media”结点，弹出“Create dielectric medium”对话框，进行如下设置。

在“Dielectric modelling”选项卡中：

Relative permittivity：epsr1_r。

Dielectric loss tangent：tan1_d。

在“Magnetic modeling”选项卡中：

Definition method：Frequency independent。

Relative permeability：ur1_r。

Magnetic loss tangent：tan1_u。

Label：diel_1，如图 9-46 所示。

单击“Add”按钮，继续设置。

在“Dielectric modelling”选项卡中：

Relative permittivity：epsr2_r。

Dielectric loss tangent：tan2_d。

在“Magnetic modeling”选项卡中：

Definition method：Non magnetic。

Label：diel_2。

单击“Create”按钮，如图 9-47 所示。

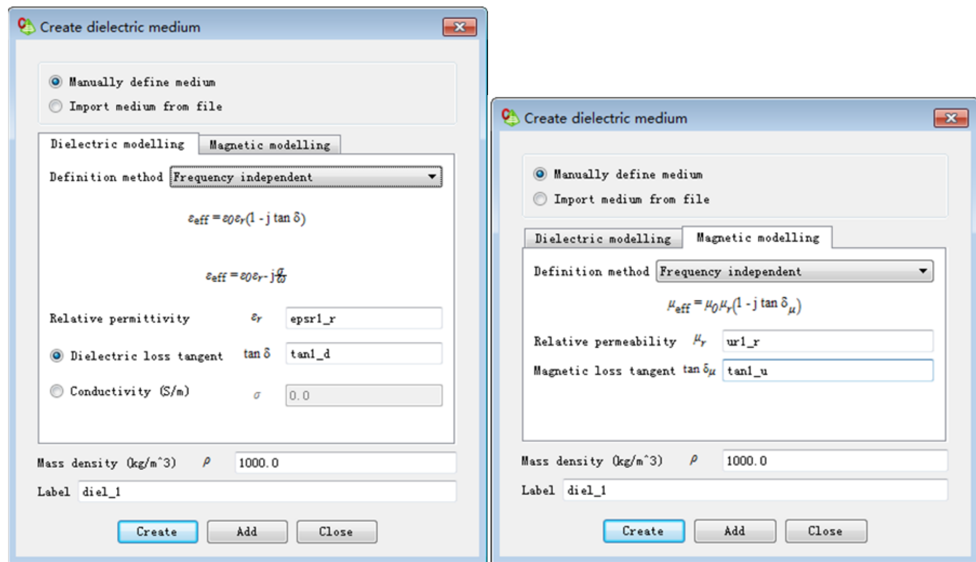


图 9-46　定义介质材料 diel_1

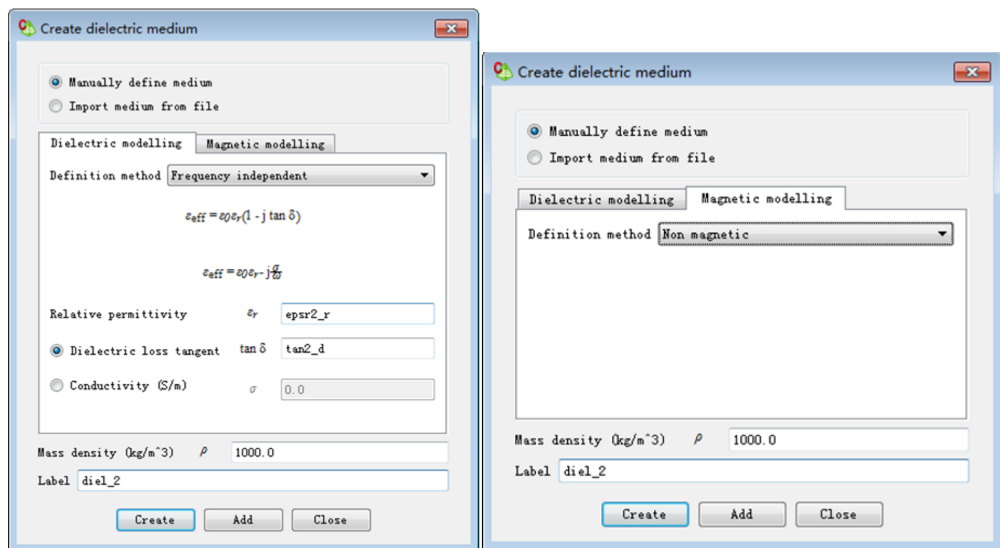


图 9-47　定义介质材料 diel_2

（3）定义几个关键点（Named points）

在左侧的树形浏览器中，选中“Definitions”结点，单击鼠标右键，选择“Add point”选项，弹出“Create named point”对话框，进行如下设置。

Name：p1。

X：lam * sin(angle*pi/180/2)。

Y：0。

Z：0。

单击“Add”按钮，继续设置。

Name：p2。

X：0。

Y：lam * cos(angle*pi/180/2)。

Z：0。

单击“Add”按钮，继续设置。

Name：p3。

把光标定位在 Point 区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击已经定义的 p1 点，然后把 X 的值改成负值。

X：−p1.x。

Y：p1.y。

Z：p1.z。

单击“Create”按钮，如图 9-48 所示。

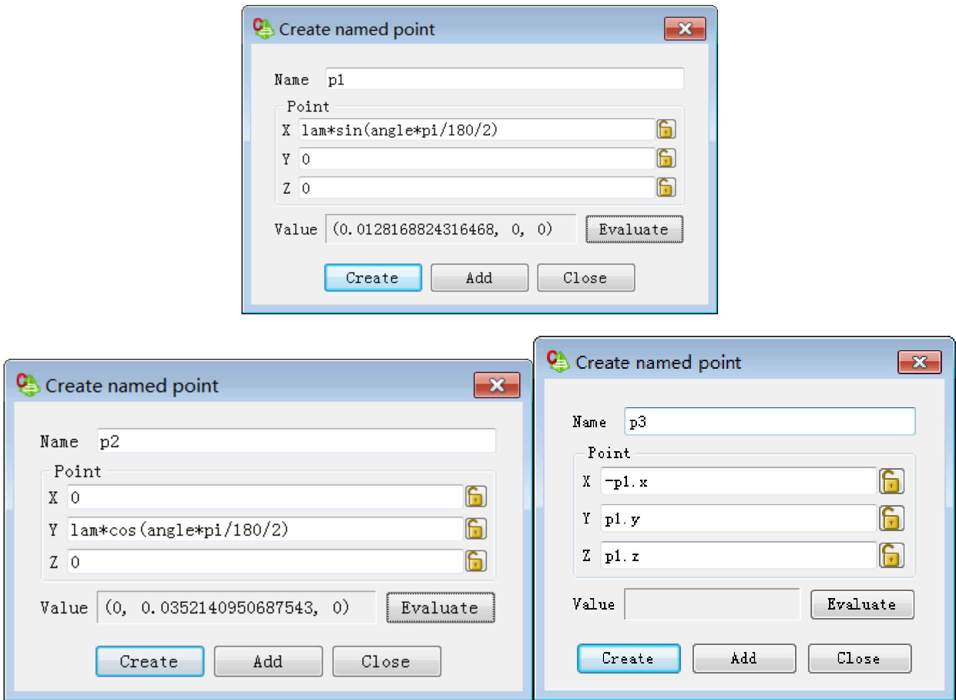


图 9-48　定义 3 个关键点 p1、p2 和 p3

（4）模型建立

单击“Construct”菜单中的“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡：

把光标定位在“Start point”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击 p1 关键点，光标自

动下移到“End point”区域，单击 p2 关键点。

Label：Line1。

单击“Add”按钮，如图 9-49 所示，继续设置。

把光标定位在“Start point”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在 3D 视图中，单击原心位置（会自动拾取到原心的坐标值），光标自动下移到“End point”区域，单击 p2 关键点。

Label：Line2。

单击“Add”按钮，如图 9-50 所示，继续设置。

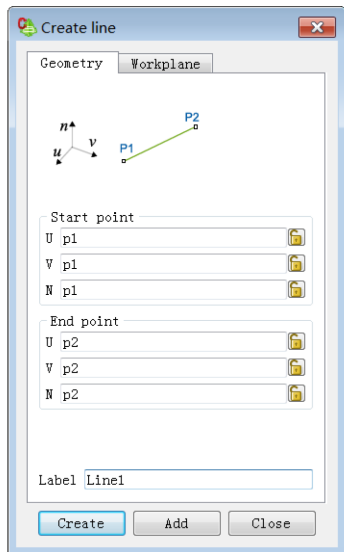


图 9-49　定义关键点 p1 与 p2 直线

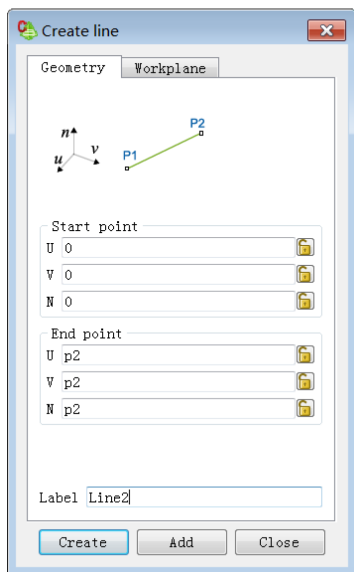


图 9-50　定义关键点原点与 p2 直线

把光标定位在“Start point”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在 3D 视图中，单击 Line1 线段的中点坐标值，光标自动下移到“End point”区域，单击 p3 关键点。

Label：Line3。

单击“Create”按钮，如图 9-51 所示。

在左侧的树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，选中新生成模型中的“Line2”和“Line3”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，新生成的模型名称为“Union1”。

在左侧的树形浏览器中，选中“Definitions”结点，单击鼠标右键，选择“Add point”选项，弹出“Create named point”对话框，进行如下设置。

Name：p4。

把光标定位在“Point”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，单击 Line2 与 Line3 的交点坐标值。

单击“Create”按钮，如图 9-52 所示。

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点的同时选中所有的模型：Line1，Line2 和 Line3，单击鼠标右键，选择“Delete”选项，删除所有已定义的线模型。

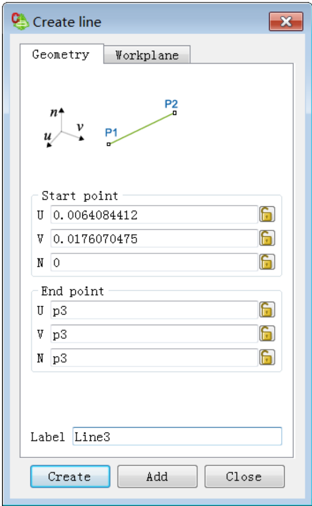


图 9-51　定义 Line1 的中点与 p3 直线

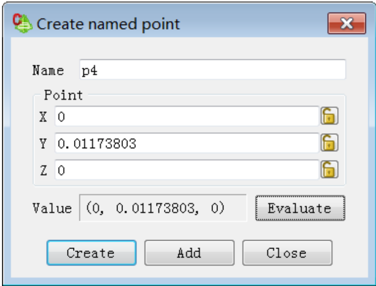


图 9-52　定义关键点 p4

进入“Construct”菜单，单击“Polygon”按钮，弹出“Create polygon”对话框，进行如下设置。

把光标定位在“Corner1”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，依次单击 p1、p4、p2。

Label：Polygon1。

单击“Add”按钮，如图 9-53 所示，继续设置。

把光标定位在“Corner1”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，依次单击 p1、p3、p4。

Label：Polygon2。

单击“Add”按钮，如图 9-54 所示，继续设置。

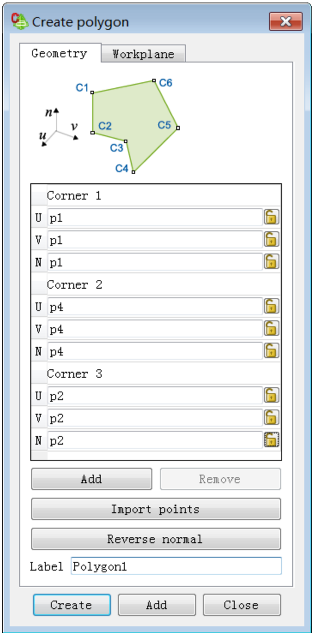


图 9-53　创建多边形面 Polygon1

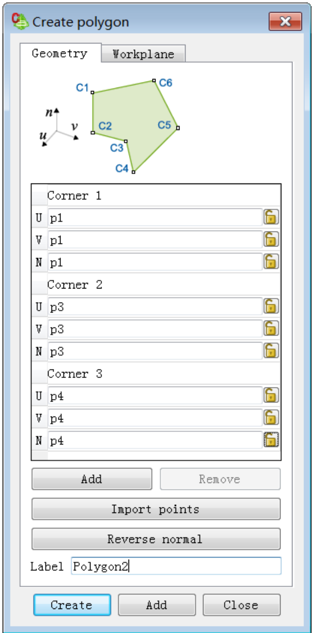


图 9-54　创建多边形面 Polygon2

把光标定位在“Corner1”区域，同时按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，依次单击 p3、p2、p4。

Label：Polygon3。

单击“Create”按钮，如图 9-55 所示。

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，同时选择已创建的所有模型“Polygon1”“Polygon2”和“Polygon3”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“base_face”。

选中模型“base_face”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Sweep”选项，弹出“Sweep geometry”对话框，进行如下设置。

From：(U：0.0; V：0.0; N：0.0)。

To：(U：0.0; V：0.0; N：lam)。

单击“Create”按钮，把新生成的模型更名为“prism”，如图 9-56 所示。

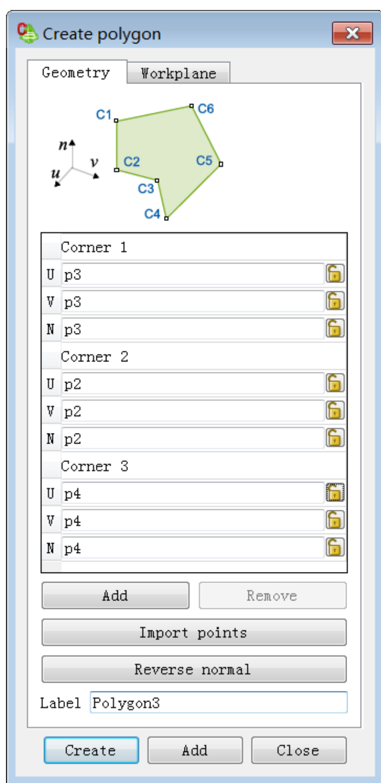


图 9-55 创建多边形面 Polygon3

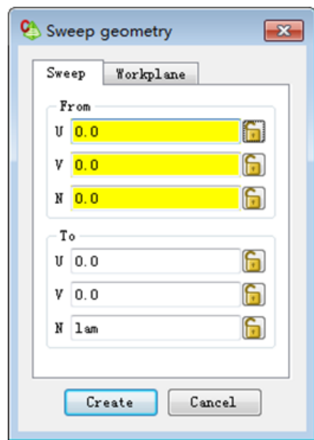


图 9-56 把面“base_face”法向拉伸成体

选中模型“prism”，单击鼠标右键，选择“Transform”→“Translate”选项，弹出“Translate”对话框，进行如下设置。

From：(U：0; V：p4.y; N：0)。

To：(U：0; V：0; N：−lam/2)。

单击“OK”按钮，如图 9-57 所示。

选中模型“prism”，单击鼠标右键，选择“Transform”→“Rotate”选项，弹出

“Rotate”对话框，进行如下设置。

Origin：(U：0; V：0.0; N：0.0)。

Axis direction：(U：0.0; V：0.0; N：1.0)。

Angle [degrees]：90。

单击“OK”按钮，如图 9-58 所示。

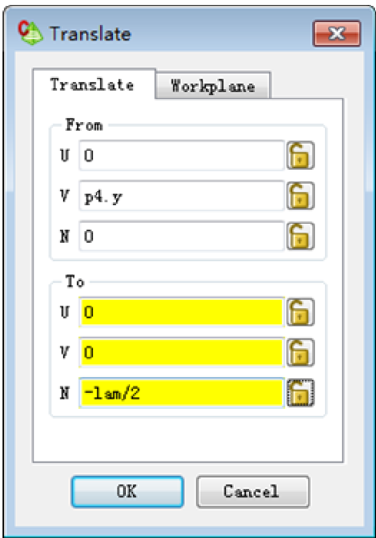


图 9-57　平移模型“prism”

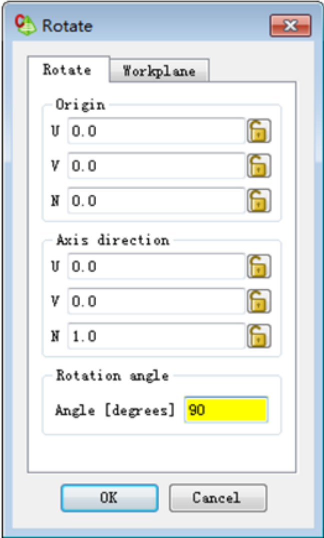


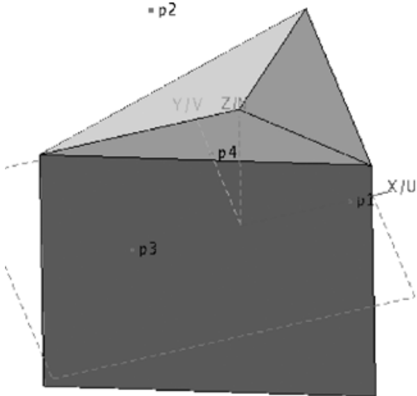
图 9-58　把模型“prism”绕 N 轴旋转 90°

（5）为模型赋材料属性

在 3D 视图中，点选图 9-59 所示的左上角体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium：diel_1。

单击“OK”按钮，如图 9-59 所示。



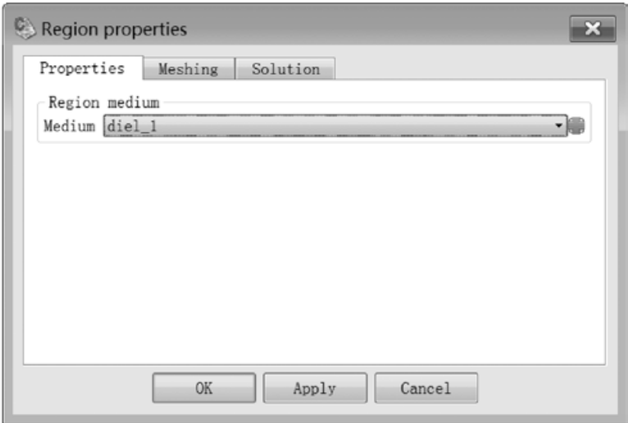


图 9-59　为黄色（左上角）的体部分（左）赋材料“diel_1”（右）

在 3D 视图中，点选图 9-60 所示的离观察者最近的体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium：diel_2。

单击“OK”按钮，如图 9-60 所示。

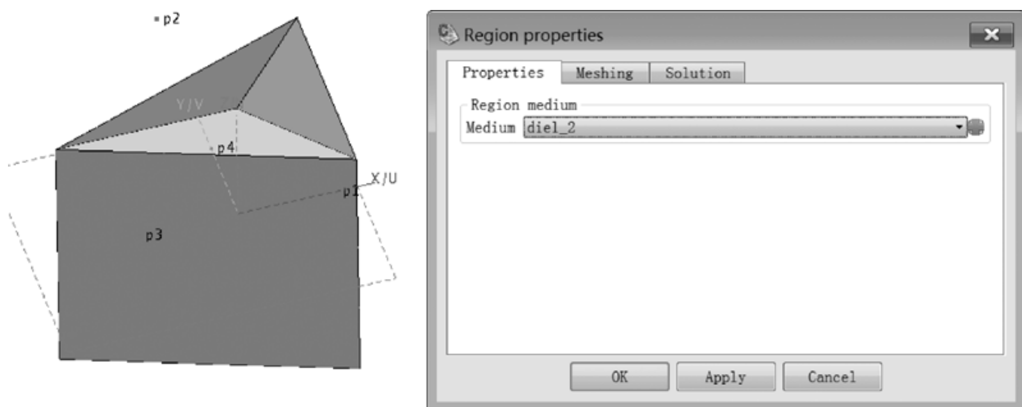


图 9-60　为黄色（离观察者最近的）体部分（左）赋材料“diel_2”（右）

（6）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮。

激励设置：在“Global”结点中，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Plane wave”选项，弹出“Add plane wave excitation”对话框，进行如下设置。

选中：Loop over multiple directions。

Start：(θ: 90, φ: 0.0)。

End：(θ: 90, φ: 360)。

Increment：(θ: 0.0, φ: 1)。

Polarisation angle(degrees)：0.0。

Polarisation：Linear。

Label：PlaneWave_VV。

单击“Create”按钮，如图 9-61 所示。

求解设置：在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

选中：Calculate fields in plane wave incident direction。

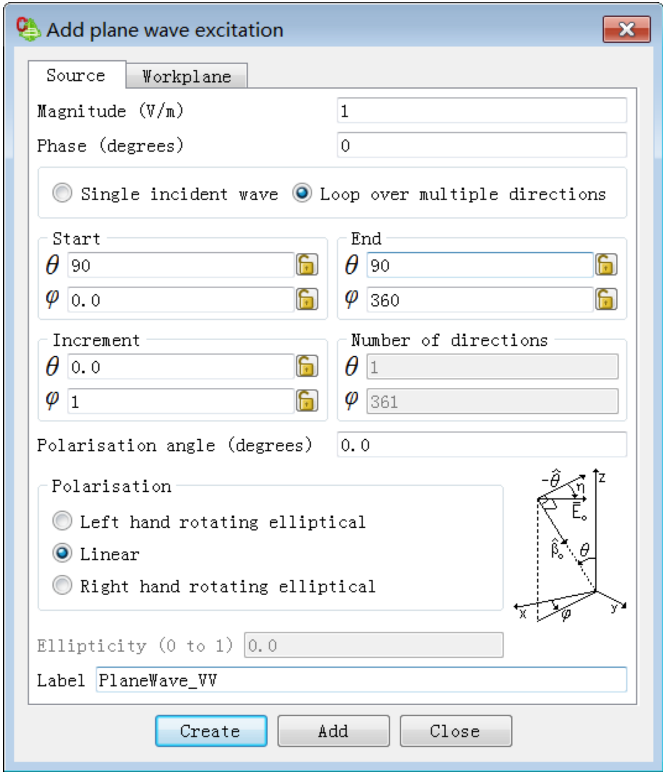


图 9-61　定义入射平面波

Label：ff_scattering。

单击“Create”按钮，如图 9-62 所示。

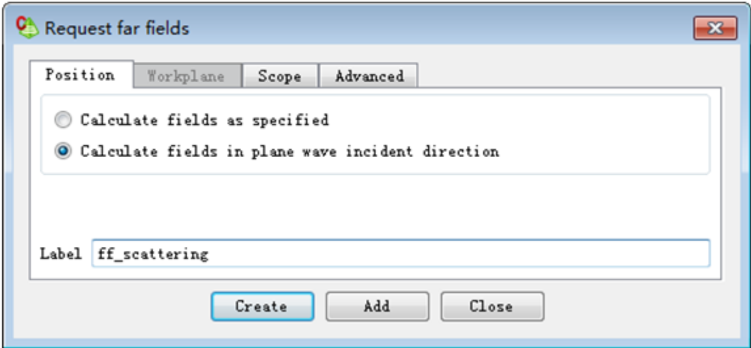


图 9-62　远场方向图求解设置

（7）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangle edge length”：lam/10。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 9-63 所示。

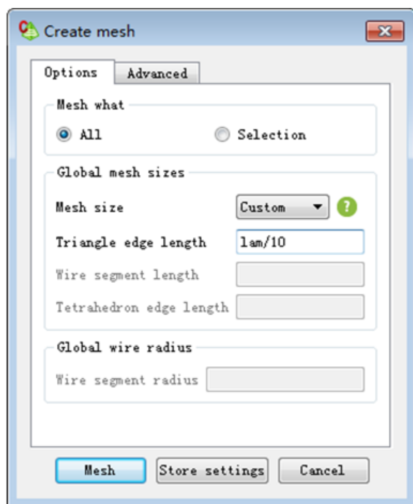


图 9-63　定义网格划分

（8）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式。

（9）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中，单击“Far field”按钮下的“ff_scattering”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。单站 RCS 显示如图 9-64 所示。

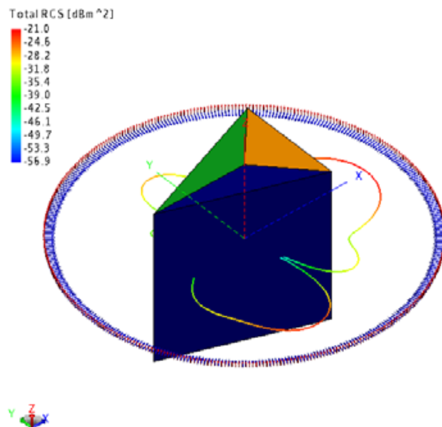


图 9-64　单站 RCS 显示

显示 2D 结果：在“Home”菜单，单击“Cartesian”，进入直角坐标系，单击“Far field”按钮下的“ff_scattering”，会在直角坐标系中直接显示 theta 为“90 deg”时极化平面上的 2D 单站 RCS。在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。垂直极化单站 RCS 如图 9-65 所示。

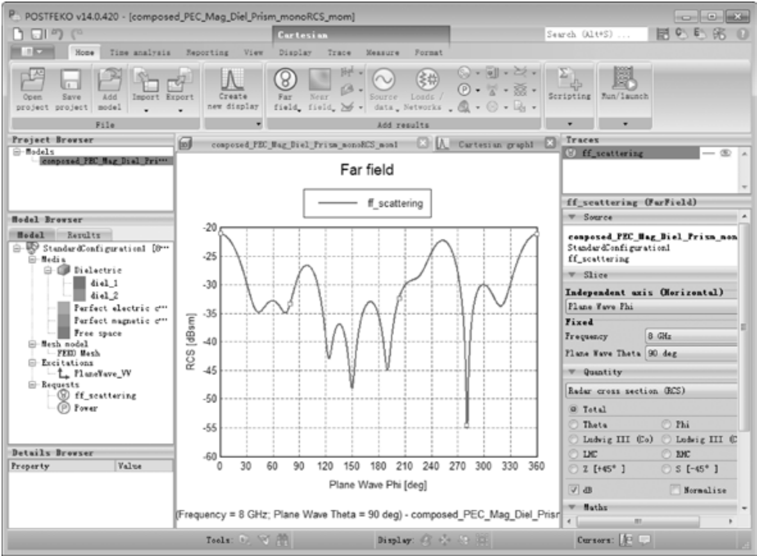


图 9-65　垂直极化单站 RCS

进入“Home”菜单，单击“Save project”按钮，保存计算结果文件为“composed_PEC_Mag_Diel_Prism_monoRCS_mom.pfs”。保持 POSTFEKO 处于打开状态。

下面采用 MoM+VEP 方法计算。

在 CADFEKO 中，单击起始菜单中的“Save as”按钮，另存为“composed_PEC_Mag_Diel_Prism_monoRCS_mom_VEP.cfx”。

（1）求解方法设置

在 3D 视图中，点选图 9-66 所示的黄色（左上角）体模型，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进入“Solution”选项卡，进行如下设置。

Solution method：MoM/MLFMM with volume equivalence principle(VEP)。

单击“OK”按钮，如图 9-66 所示。

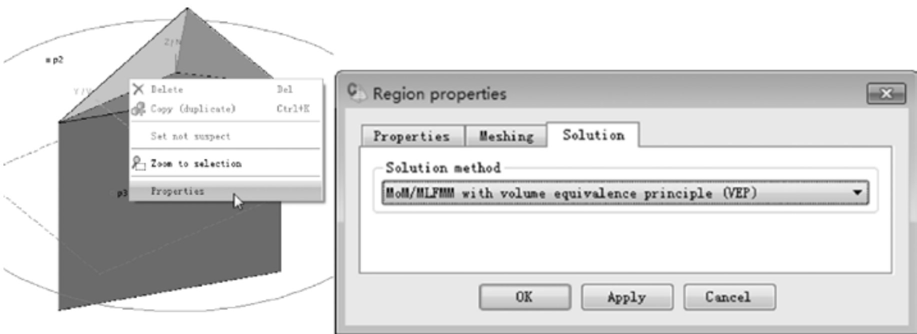


图 9-66　为黄色（左上角）体部分（左）设置求解方法“VEP”（右）

在 3D 视图中，点选图 9-67 所示的离观察者最近的体，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进入“Solution”选项卡，进行如下设置。

Solution method：MoM/MLFMM with volume equivalence principle (VEP)。

单击“OK”按钮，如图 9-67 所示。

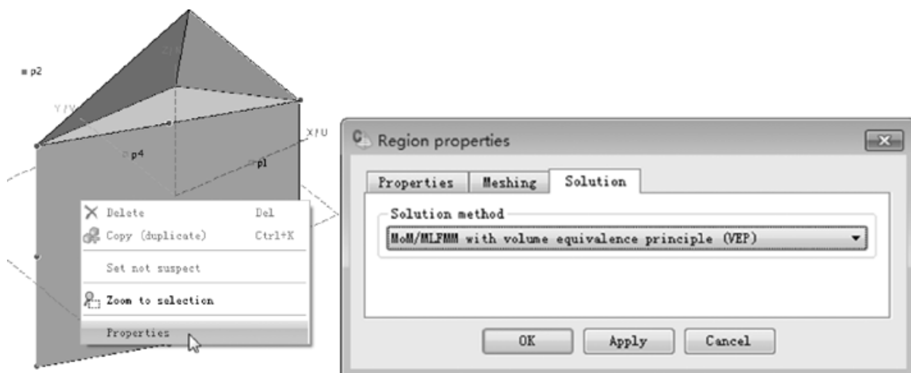


图 9-67 为黄色体部分（左）设置求解方法“VEP”（右）

（2）网格生成

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

三角形单元尺寸“Triangle edge length”：lam/10。

四面体网格单元尺寸“Tetrahedron edge length”：lam/10。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 9-68 所示。

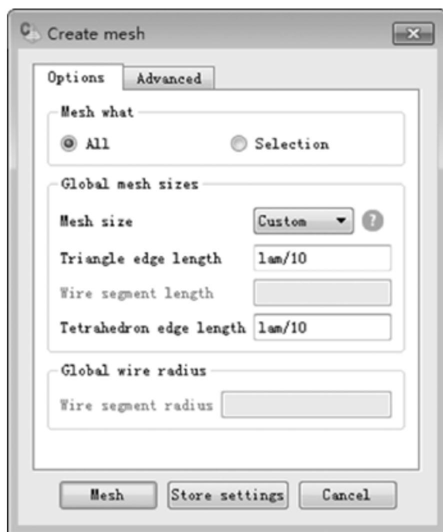


图 9-68 生成网格

（3）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（4）后处理结果显示

返回 POSTFEKO，在“Home”菜单中单击“Add model”按钮，读入文件“composed_PEC_Mag_Diel_Prism_monoRCS_mom_VEP.bof”。

返回“Cartesian Graph1”2D 视图，在“Home”菜单中，单击“Far field”按钮下的“composed_ PEC_Mag_Diel_Prism_monoRCS_mom_VEP.bof”中的“ff_scattering”，在右侧的面板中选择“Traces”区域内的“ff_scattering_1”，勾选“dB”复选框。2D 结果显示如图 9-69 所示。在“Home”菜单中单击“Save Project”按钮，保存该工程文件为“composed_ PEC_Mag_Diel_Prism_mono RCS_compair_result.pfs”。

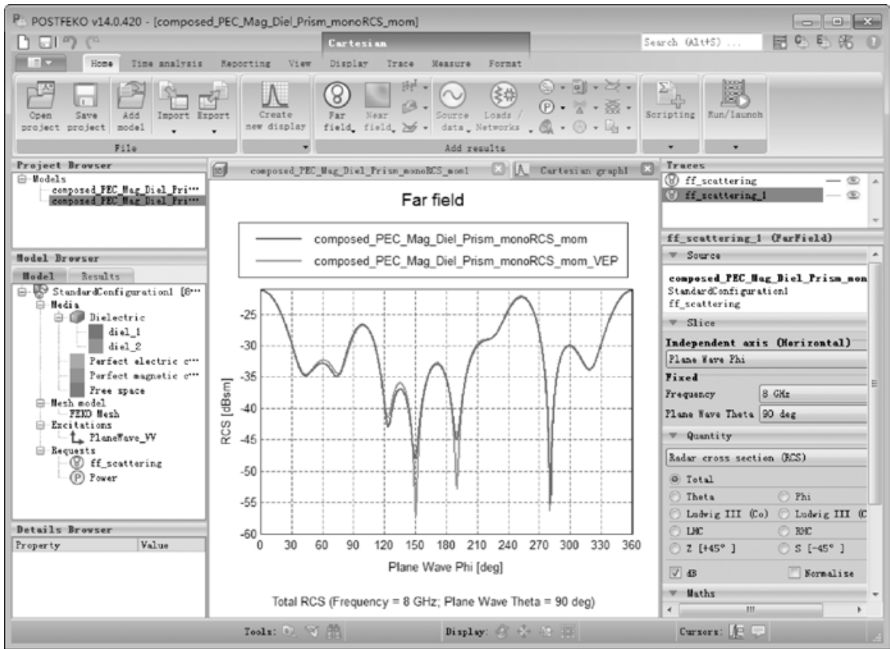


图 9-69　2D 结果显示（MoM+Sep 与 MoM+VEP 的对比）

复杂目标的 RCS 分析涉及对模型的几何清理、修补及高质量的网格划分。HyperMesh 是 Altair 公司研发的一款专业的 CAE 前处理工具。应用 HyperMesh 工具可以为 FEKO 进行复杂目标的 RCS 计算提供高质量的网格。HyperMesh 工具具有以下特点：

（1）广泛的 CAD/CAE 模型接口

HyperMesh 工具具有全面的 CAD 软件接口，直接支持全球各主流三维 CAD 模型文件和通用数据格式，模型读入过程快速、准确，避免数据丢失和几何缺陷，并具有单位制转换和自动几何清理功能。

各种 CAD 模型通过 HyperMesh 工具进行模型修补和网格划分，均可输出成 IGES 等通用格式的几何文件，或各种格式的网格文件，如 NASTRAN、ABAQUS 等，这些文件可直接导入 FEKO 中进行设置计算。

（2）几何模型清理和修补功能

HyperMesh 工具具有全套的几何模型清理功能，用户可以自己手工清理，也可以定义规则由软件自动清理。如果输入的几何曲面中存在缝隙、重叠、不对齐或曲面丢失等现象，则会严重妨碍网格自动划分的质量，HyperMesh 工具可以快速清理这些几何缺陷，如去倒角、去倒圆、去孔缝等，如图 9-70 所示。

HyperMesh 工具支持交互地修补曲面，填充丢失的曲面，删除重复的曲面。

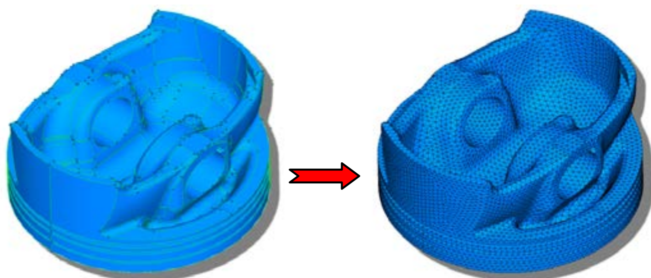


图 9-70　根据网格质量要求自动修复曲面

从 Catia 等 CAD 软件获得的几何文件通常带有厚度，在利用 FEKO 软件分析时无须保留厚度，因此可利用 HyperMesh 工具对复杂几何体的表面或中面进行提取。

（3）网格生成和质量控制

HyperMesh 是一个超强的网格划分工具，拥有全套的一维、二维、三维网格划分功能。

1）一维网格。对于一维网格，HyperMesh 工具提供了从结点、曲线、单元边线等直接生成一维单元的方法。针对 FEKO 中的线模型，HyperMesh 工具可生成高质量的一维网格，方便控制曲线和单元边线等。

2）二维网格。HyperMesh 工具具有强大的二维网格自动划分功能。针对 FEKO 软件三角形网格需求，HyperMesh 工具可生产高质量的三角形网格。二维网格模型示例如图 9-71 所示。

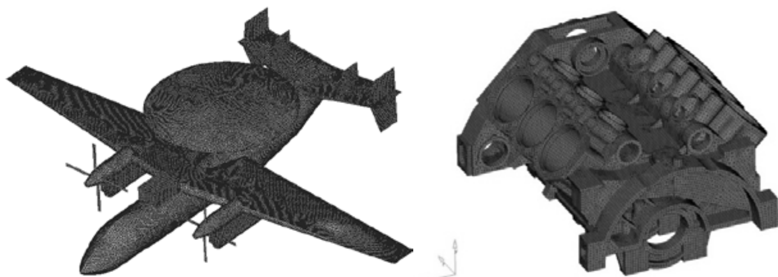


图 9-71　二维网格模型示例

HyperMesh 工具的单元编辑功能也非常强大，不仅可以方便地对单元进行添加、删除、分割、合并、结点调整等操作，还可以同单元质量检查功能一起应用，在生成单元的同时显示其质量参数，自动优化单元质量。

3）四面体网格及六面体网格（见图 9-72）。HyperMesh 工具拥有较好的四面体网格及六面体网格生成算法，可以快速生成各种高质量的结构网格和流体网格及电磁场分析有限元网格。QuickTetraMesh 是专业的自动四面体网格划分工具，支持自动几何拓扑关系修复和自动网格质量优化，能提高四面体网格划分速度达数 10 倍。

4）外部网格的重构。HyperMesh 工具也支持外部网格的读入并对其进行网格优化。现在，在很多网站上均会提供一些网格较为粗糙的网格模型用于复杂模型的渲染，HyperMesh 工具可以读入这些网格模型并重构成体模型，然后基于重构的体模型重新生成用于电磁场分

析的高质量网格。

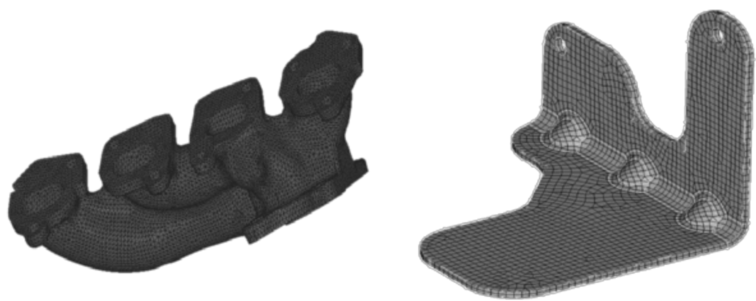


图 9-72　四面体网格（左）及六面体网格（右）

（4）网格的输出

HyperMesh 工具进行模型编辑和网格生成时，可以基于分组单独进行处理，在导出成网格的时候，可以控制得到的网格也按照分组一次输入，而不会合并，这样有助于在 FEKO 中单独设置各自不同部分的材料等参数。

HyperMesh 还是一款非常强大的几何清理和网格生成前处理工具。Altair 公司每年在上海、北京、广州和西安会安排一系列的公开课培训，感兴趣的读者可以与笔者联系。在 Altair 公司的百度云（https://yun.baidu.com/s11ptuYob#list/path=%2FHyperWorks）上也可以找到关于 HyperMesh 工具的培训材料，读者还可以在各大书店找到关于 HyperMesh 工具的系列丛书。

第 10 章

其他工程仿真案例



10.1 非辐射网络应用
10.2 天线优化设计
10.3 天线特征模分析（CMA）
10.4 机箱屏蔽效能
10.5 生物电磁

10.1 非辐射网络应用

天线通常包含辐射单元以及馈电网络部分。馈电网络为辐射单元实现激励的幅度和相位的分配。尽管通常仿真天线单元时无须包含馈电网络部分，但馈电网络的设计对整体天线的性能非常重要，因此仿真时需要考虑建模馈电网络。在 FEKO 中馈电网络可以模拟为 3D 模型，也可以采用非辐射网络来等效。本节将介绍非辐射网络的应用。图 10−1 所示为实际网络的几何模型与非辐射网络的电路形式。

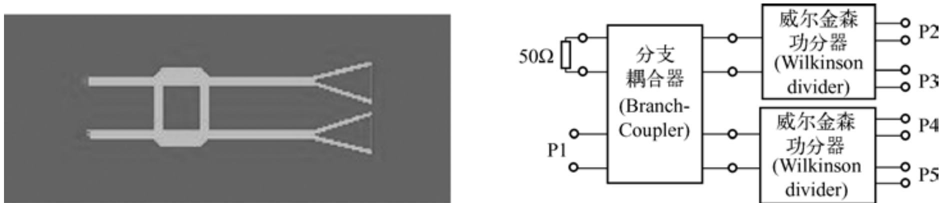


图 10−1 实际网络的几何模型（左）与非辐射网络的电路形式（右）

10.1.1 S参数非辐射网络

本节采用 S 参数非辐射网络计算一个右旋圆极化天线。首先计算天线的馈电网络，保存 S 参数矩阵（Touchstone 格式），本节采用 S 参数非辐射网络计算一右旋圆极化天线。首先计算天线的两端口馈电网络，保存 S 参数矩阵（Touchstone 格式-s2p），然后将此 S 参数矩阵文件定义为非辐射网络，一端口添加电压源，另一端口与天线馈电端口级联，通过 FEKO 计算该天线的端口性能，并与全模型计算结果进行比对。完整的天线模型如图 10−2 所示。

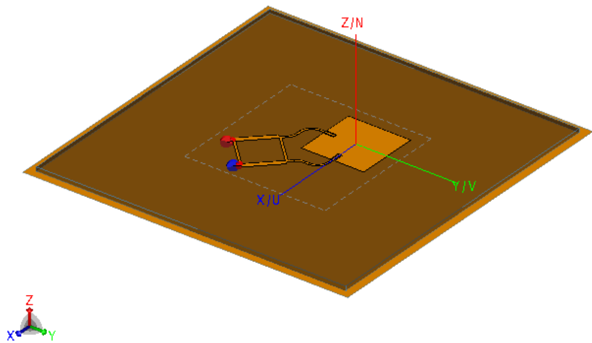


图 10−2 右旋圆极化天线与非辐射网络

1．馈电网络分析

启动 CADFEKO，新建一个工程“feedNetwork.cfx”。采用默认长度单位 m（米）。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中，展开“Definitions”结点，双击“Variables”结

点，依次定义如下变量。

工作频率：freq = 2.4e9。

工作波长：lam0 = c0/freq。

介质基板高度：h = 2.5e−3。

相对介电常数：epsr = 2.2。

介质损耗正切：tand = 0.0012。

介质波长：lamd = lam0/sqrt(epsr)。

lamEffZ0 = lam0/sqrt(1.74)。

lamEffZ1 = lam0/sqrt(1.79)。

lenZ0 = lamEffZ0/4。

lenZ1 = lamEffZ1/4。

mline = 3e−3。

wL = 1.4e−3。

W = 39.0e−3。

offsetZ0 = wL/2。

rb = 7e−3。

s = W/2+mline+rb−(lenZ0+2*rb*(1−cos(pi/4)))/sqrt(2)=0.00986。

stb_len = lamEffZ1/25=0.003735。

w1 = 3.2e−3。

y0 = 6.50e−3，如图 10−3 所示。

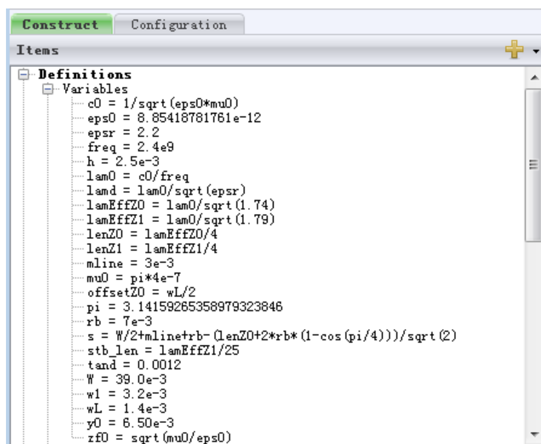


图 10−3　定义变量

创建“Named points”，在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中，双击“Named points”结点，弹出“Create named point”对话框，进行如下设置。

Name：connect_point。

X：W/2+mline+rb+rb*(1−cos(pi/4))。

Y：−s−rb*sin(pi/4)。

Z：0.0，如图 10−4 所示。

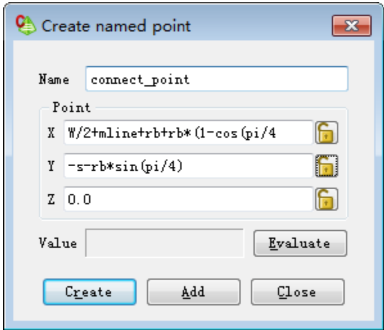


图 10-4　创建关键点“connect_point”

双击“Media”结点，弹出“Create dielectric medium”对话框，创建介质材料“Rogers Duroid5870”，具体设置如下。

Relative permittivity：epsr。

Dielectric loss tangent：tand。

Label：RogersDuroid5870。

单击“Create”按钮，如图 10-5 所示。

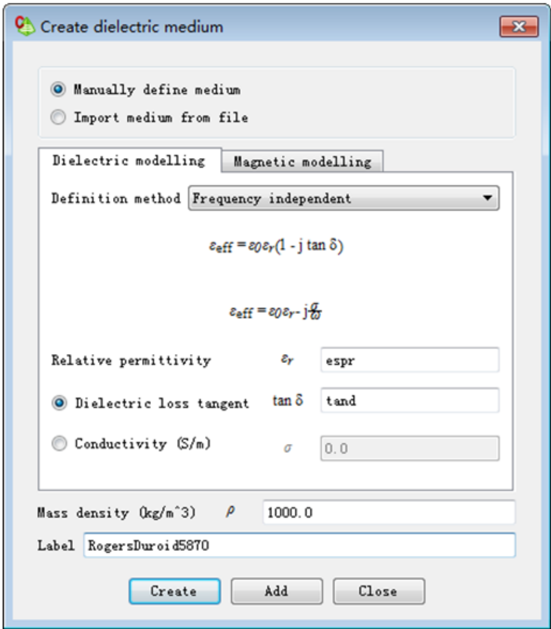


图 10-5　创建介质材料

（2）定义无限大介质平面

在“Construct”菜单中，单击“Planes/arrays”按钮下的“Plane/ground”，弹出“Plane/ground”对话框，设置如下。

Ground medium：Planar multilayer substrate。

Layer_1：“Thickness”设置为“h”，“Medium”设置为“RogersDuriod5870”。

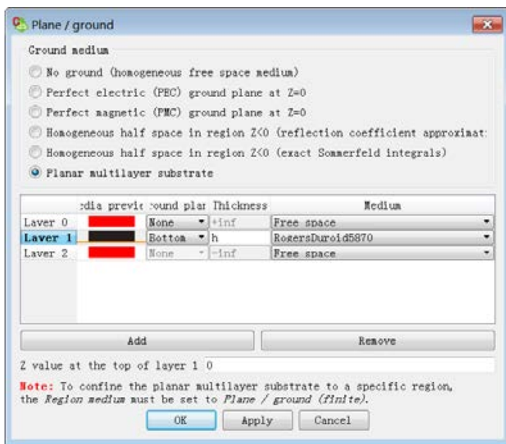


图 10-6　无限大介质平面设置

（3）模型创建

在“Construct”菜单中单击“Create surface”中的“polygon”，创建多边形 Polygon1，具体设置如下。

Corner 1：(U：0, V：−wL/2, N：0)。

Corner 2：(U：stb_len, V：−wL/2, N：0)。

Corner 3：(U：stb_len, V：wL/2, N：0)。

单击中间位置的“Add”按钮，继续设置。

Corner 4：(U：0, V：wL/2, N：0)。

Label：Polygon1。

单击下部的“Add”按钮，如图 10-7 所示。

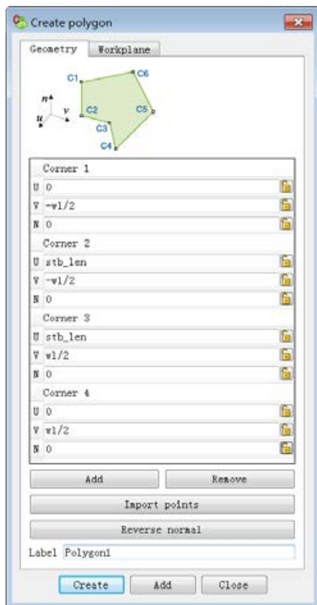


图 10-7　创建多边形 Polygon1

“Create polygon”对话框保持打开状态，创建多边形 Polygon2，在“Create polygon”中首先修改“Workplane”选项卡，具体设置如下。

Origin：(X：stb_len, Y：0.0, Z：0.0)。

其他保持不变，如图 10-8 所示。

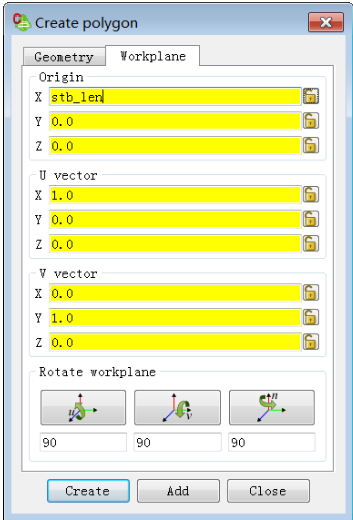


图 10-8　创建多边形 Polygon2 的 workplane

返回“Geometry”选项卡，Polygon2 的结点为：

Corner 1：(U：0,V：−wL/2, N：0.0)。

Corner 2：(U：lenZ1, V：−wL/2, N：0.0)。

Corner 3：(U：lenZ1, V：wL/2, N：0.0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 4：(U：lenZ1−wL/2, V：w1−wL/2, N：0.0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 5：(U：wL/2, V：w1−wL/2, N：0.0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 6：(U：0.0, V：wL/2, N：0.0)。

单击下部的“Add”按钮。

“Create polygon”对话框保持打开状态，创建多边形 Polygon3，在“Create polygon”中首先修改“Workplane”选项卡，具体设置如下。

Origin：(X：stb_len−offsetZ0, Y：−wL/2, Z：0.0)。

其他保持不变，如图 10-9 所示。

返回“Geometry”选项卡，Polygon3 的结点坐标值为：

Corner 1：(U：0.0, V：0.0, N：0.0)。

Corner 2：(U：0.0, N：0.0, V：−lenZ0/2+wL/2)。

Corner 3：(U：wL, V：−lenZ0/2+wL/2, N：0.0)。

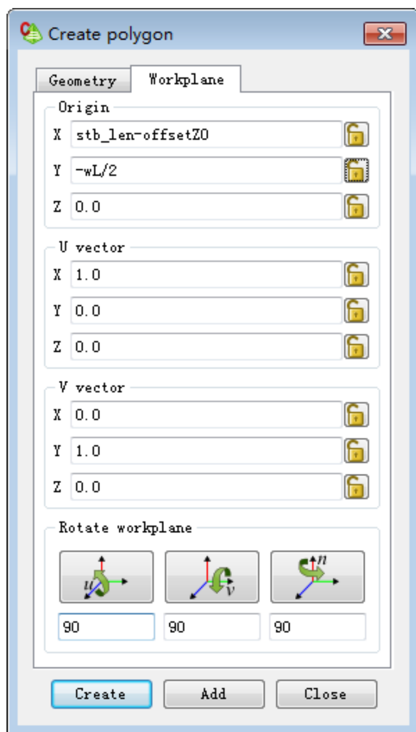


图 10-9　创建多边形 Polygon3 的 workplane

单击中部的“Add”按钮。

Corner 4：(U：wL, V：0.0, N：0.0)。

单击“Create”按钮。

在左侧的树形浏览器的“Model”→“Geometry”节点中，选中“Polygon1”并单击鼠标右键，选择“Copy and translate”选项，弹出“Copy and translate”对话框，在“Translate”选项卡中进行如下设置。

From：(U：0, V：0, N：0)。

To：(U：lenZ1+stb_len, V：0, N：0)。

Number of copies：1。

单击“OK”按钮，创建 Polygon1_1，如图 10-10 所示。

选中“Polygon3”，单击鼠标右键，选择“Copy and mirror”选项，弹出“Copy and mirror”对话框，在“Mirror”选项卡中进行如下设置。

Origin：(U：stb_len+lenZ1/2, V：0.0, N：0.0)。

Plane：VN。

单击“OK”按钮，创建 Polygon3_1，如图 10-11 所示。

同时选择“Ploygon1”“Ploygon1_1”“Ploygon2”“Ploygon3”和“Ploygon3_1”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，合并后的模型重命名为“half_hybrid”。选择该模型，单击鼠标右键，选择“CopySepical”→“Copy and mirror”选项，弹出“Copy and mirror”对话框，在“Mirror”选项卡中进行如下设置。

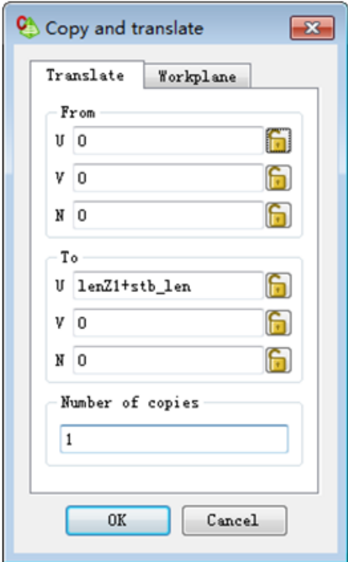


图 10-10　创建多边形 Polygon1_1

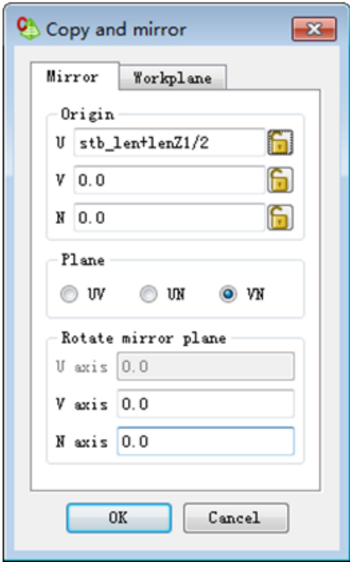


图 10-11　创建多边形 Polygon3_1

Origin：(U：0.0, V：−lenZ0/2, N：0.0)。

Plane：UN。

单击“OK”按钮，创建“half_hybrid_1”，如图 10-12 所示。

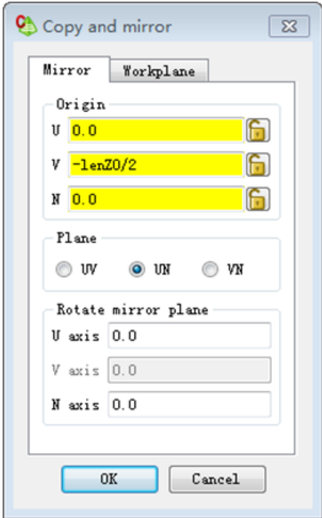


图 10-12　创建模型 half_hybrid_1

同时选中“half_hybrid”与“half_hybrid_1”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项。将该模型重新命名为“hybrid”，选择该模型并单击鼠标右键，选择沿着 Z 轴旋转−45°，沿 From(U:0, V:0, N:0)→To(U:connect_point, V:connect_point, N:connect_point)平移模型。

在“Construct”菜单中单击“Create arc”中的“Elliptic”，创建圆弧。在弹出的“Create

elliptic arc”对话框中首先修改“Workplane”选项卡，具体设置如下。

Origin：(X：rb, Y：−W/2−mline, Z：0.0)。

其他保持不变，如图 10−13 所示。

返回“Geometry”选项卡，具体设置如下。

Radius (Ru)：rb−wL/2 , Radius(Rv)：rb−wL/2。

Start angle(A0)：180, End angle(A1)：270。

其他采用默认设置，如图 10−14 所示。

单击“Add”按钮，创建“EllipticArc1”。

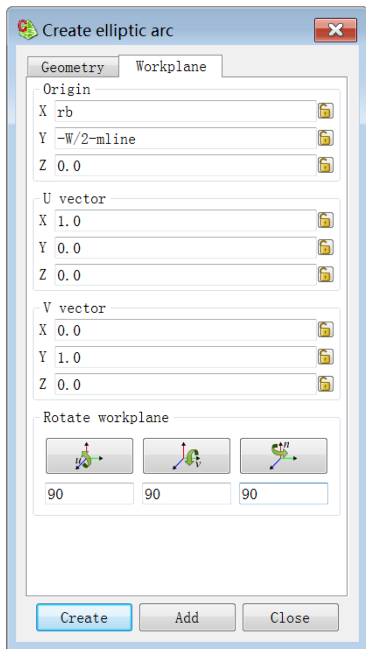


图 10−13　创建模型定义坐标系

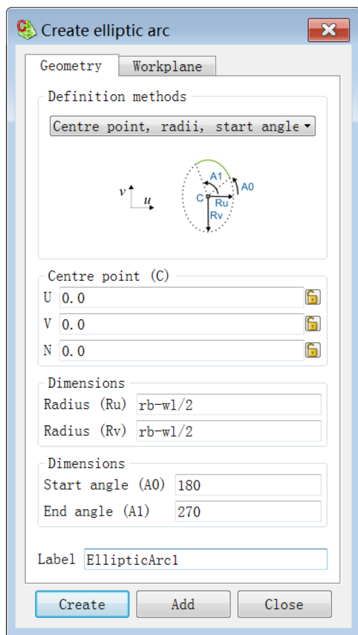


图 10−14　创建模型圆弧 EllipticArc1

“Create elliptic arc”对话框保持打开状态，修改“Radius(Ru)”与“Radius(Rv)”为“rb+wl/2”，单击“Create”按钮，创建“EllipticArc2”。

在左侧的树形浏览器的“Model”→“Geometry”结点中，同时选中“EllipticArc1”与“EllipticArc2”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Loft”选项，创建新的面模型，并重命名为“bend1”。

再次在“Construct”菜单中单击“Create arc”中的“Elliptic”，创建圆弧。在弹出的“Create elliptic arc”对话框中首先修改“Workplane”选项卡，具体设置如下。

Origin：(X：s, Y：−W/2−mline−2*rb, Z：0.0)。

其他保持不变，如图 10−15 所示。

返回“Geometry”选项卡，具体设置如下。

Radius (Ru)：rb−wL/2 , Radius(Rv)：rb−wL/2。

Start angle(A0)：90, End angle(A1)：45。

其他采用默认设置，如图 10−16 所示。

单击“Add”按钮，创建“EllipticArc1”。

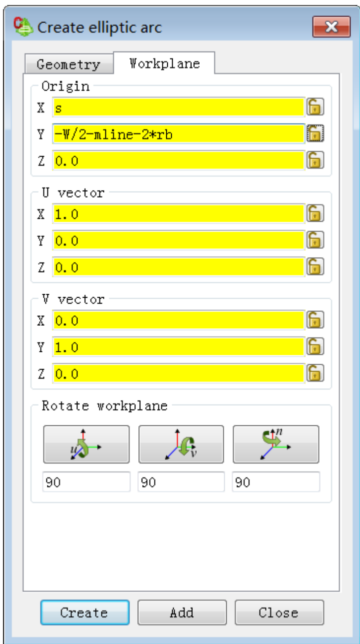


图 10-15　创建模型定义坐标系

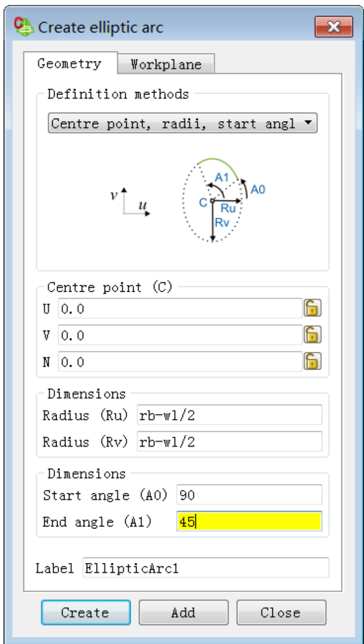


图 10-16　创建模型圆弧 EllipticArc1

“Create elliptic arc”对话框保持打开状态，修改“Radius(Ru)”与“Radius(Rv)为“rb+wL/2”，单击“Create”按钮，创建“EllipticArc2”。

在左侧的树形浏览器的“Model”→“Geometry”结点中，同时选中“EllipticArc1”与“EllipticArc2”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Loft”选项，创建新的面模型，并重命名为“bend2”。

在“Construct”菜单中单击“Create surface”中的“polygon”，创建多边形 bridge，在“Create polygon”对话框中首先修改“Workplane”选项卡，具体设置如下。

Origin：(X：rb, Y：−W/2−mline−rb, Z：0.0)。

其他保持不变，如图 10-17 所示。

返回“Geometry”选项卡，bridge 的结点坐标为：

Corner 1：(U：0.0, V：−wL/2, N：0.0)。

Corner 2：(U：s−rb, V：−wL/2, N：0.0)。

Corner 3：(U：s−rb, V：wL/2, N：0.0)。

单击中部的“Add”按钮。

Corner 4：(U：0, V：wL/2, N：0.0)。

单击下部的“Add”按钮，创建多边形“bridge”。

“Create polygon”对话框保持打开状态，创建多边形“feedxt”，在“Create polygon”对话框中首先修改“Workplane”选项卡，具体设置如下。

Origin：(X：0, Y：−W/2, Z：0.0)

其他保持不变，如图 10-18 所示。

切回到“Geometry”标签，feedxt 的结点坐标为：

Corner 1：(U：−wL/2, V：−mline, N：0.0)。

Corner 2：(U：wL/2, V：−mline, N：0.0)。

Corner 3：(U：wL/2, V：0.0, N：0.0)。

单击中部的“Add”按钮。

Corner 4：(U：−wL/2, V：0.0, N：0.0)。

单击下部的“Create”按钮，创建多边形“feedxt”。

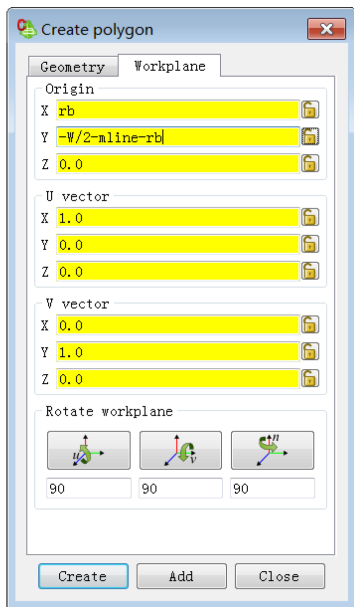


图 10-17　创建多边形 bridge 的 workplane

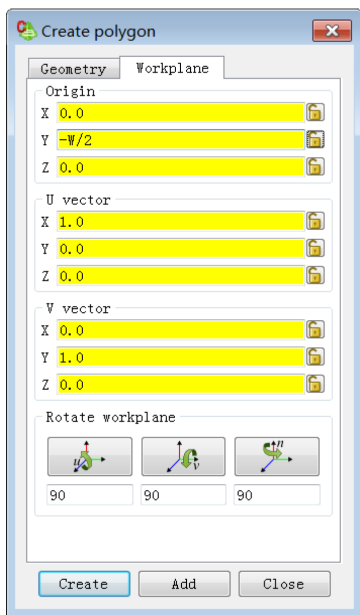


图 10-18　创建多边形 feedxt 的 workplane

同时选择模型“bend1”“bend2”“bridge”“feedext”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，并重新命名为“connect1”，选中此模型并单击鼠标右键，选择“Apply”→“Simplify”选项，采用默认设置对模型进行简化。

选中简化后的模型，单击鼠标右键，选择“Copy and special”→“Copy and mirror”选项，在弹出的“Copy and mirror”对话框中选择“Workplane”选项卡，把光标定位在“Origin”区域，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在 3D 视图中单击图 10-19 所示位置，会自动拾取到该点所在的坐标系（注意，V 轴平行于当前棱边，所以在下一步操作时选择 UN 平面）。

返回“Mirror”选项卡，将“Plane”设置为“UN”，单击“OK”按钮，如图 10-20 所示。

同时选择创建的“hybird”“Connect1”“Connect2”模型，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，重命名模型为“feed_network”。

在 3D 视图中，调整模型的显示位置，把光标定位在图 10-21 所示的棱边上，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Microstrip port”选项，弹出“Create microstrip port (geometry)”对话框，进行如下设置。

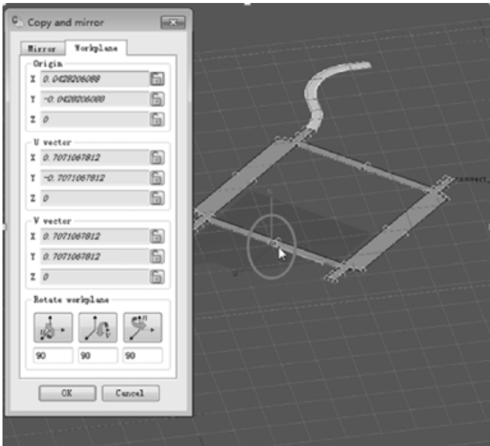


图 10-19　mirror 的 Workplane

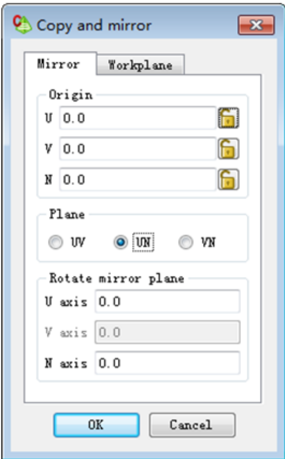


图 10-20　mirror 的坐标设置

勾选：Reverse polarity。

Label：Port1。

单击下部的“Add”按钮，如图 10-21 所示。

选择模型的边创建端口（Microstrip port）“Port1”。如图 10-22 所示，再依次创建端口 Port2、Port3、Port4。

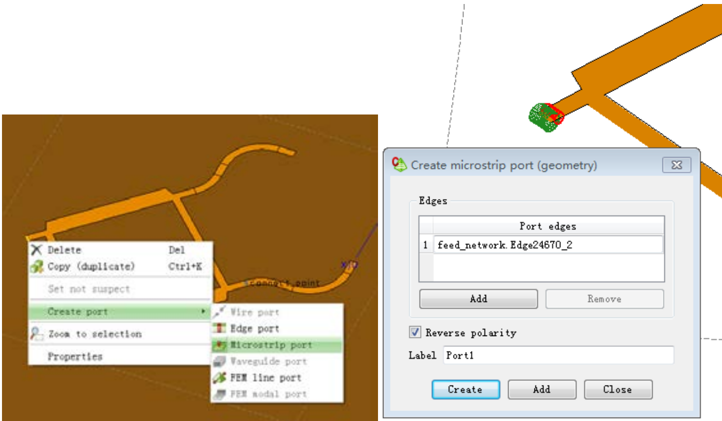


图 10-21　创建微带端口 1

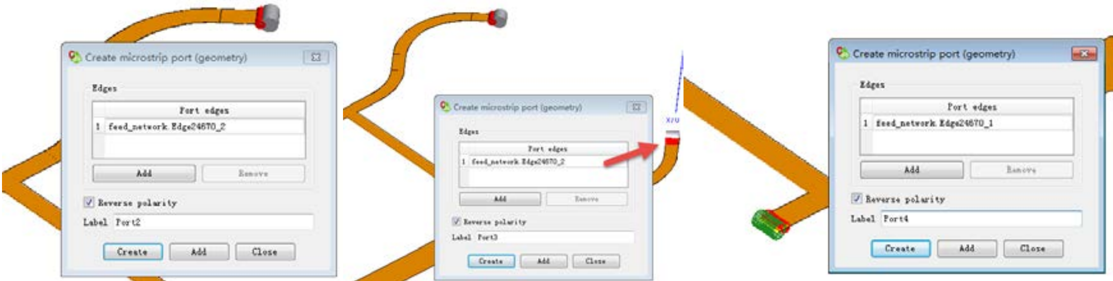


图 10-22　创建微带端口 2、端口 3 和端口 4

创建后的微带端口 1、2、3、4 示意图如图 10-23 所示。

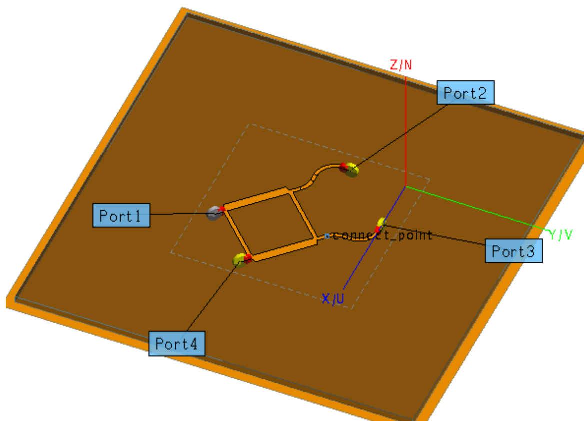


图 10-23　创建后的微带端口 1、2、3、4 示意图

在左侧的树形浏览器中，选择“Configuration”选项卡，选中“Global”结点并单击鼠标右键，选择“Add load”选项，为 Port4 加载 120Ohm 的阻抗，如图 10-24 所示。

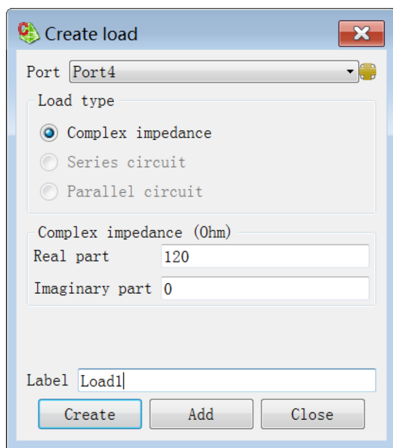


图 10-24　为 Port4 加载 120Ohm 的阻抗

展开“Global”结点，双击“Frequency”结点，设置计算频率，扫频方式设置为“Continuous (interpolated) range”，设置“Start frequency (Hz)”为“freq*0.8”、“End frequency (Hz)”为“freq*1.2”。

右键单击“Request”结点，选择“Multi-port S-parameters”选项，弹出“Request S-parameters”对话框，进行如下设置。

单击中间的“Add”按钮两次。

Port 列：从上到下依次选择 Port1、Port2、Port3。

Properties 列：从上到下依次定义特性阻抗为 120。

Active 列：从上到下依次勾选“Active”复选框。

勾选：Export S-parameters to Touchstone file (*.snp)，如图 10-25 所示。

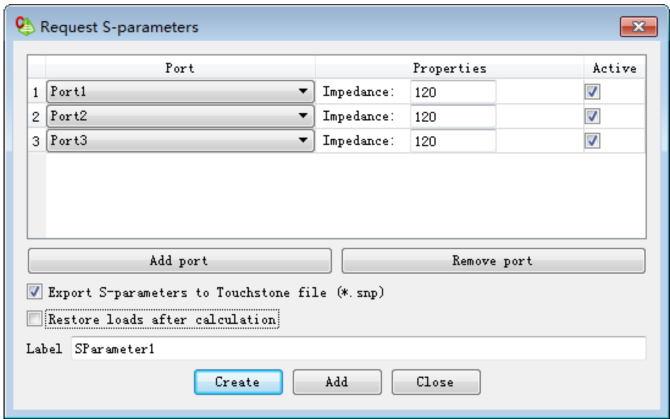


图 10-25　设置 S 参数计算

（4）生成网格

选中模型中所有的面，设置局部网格尺寸为 wL。单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，“Mesh size”设置为“Standard”，单击“Mesh”按钮进行网格剖分。

（5）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

计算完成后将在工程路径中生成文件“feedNetwork_SParameter1.s3p”，得到这个分支定性耦合器的端口 S 参数文件。

2. 非辐射网络与天线一体仿真

将工程“feedNetwork.cfx”另存为“touchstoneFedPatch.cfx”。

删除“Gemetry”下的所有模型，相应地在“Configurations”中的“SParameter Configuration1”会自动删除，包括端口、加载等，重新建立天线模型。

在“Named Points”中删除关键点“connect_point”；在“Variables”中，依次删除 w1、stb_len、s、rb、offsetZ0、mline、lenZ1、lenZ0、lamEffZ1、lamEffZ0。

（1）模型建立

在“Construct”选项卡中选择“Create surface”中的“Rectangle”，弹出“Create rectangle”对话框，进行如下设置。

Base centre(C)：(U：−W/2, V：−W/2, N：0.0)。

Width(W)：W，Depth(D)：W。

Label：patch，如图 10-26 所示。

单击“Add”按钮，继续设置。

保持“Create rectangle”对话框处于打开状态，创建“cut_away_1”，具体设置如下。

Base Corner(C)：(U：−wL, V：−W/2, N：0.0)。

Width(W)：wL*2，Depth(D)：y0。

Label：cut_away_1。

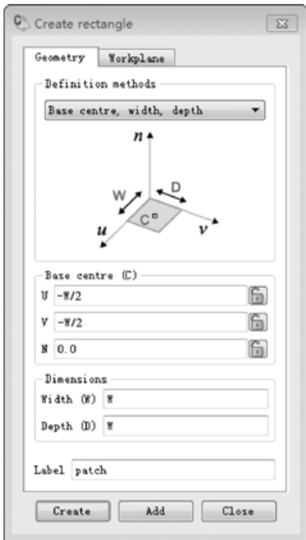


图 10-26　创建 patch

单击“Create”按钮，如图 10-27 所示。设置所有面元局部网格尺寸为 wL。

选中该模型并单击鼠标右键，选择“Copy special”→“Copy and rotation”选项，弹出“Copy and rotation”对话框，进行如下设置。

Angle[degrees]：90。

其他采用默认设置，如图 10-28 所示。

单击“OK”按钮，创建新的面模型，并重命名为“cut_away_2”。

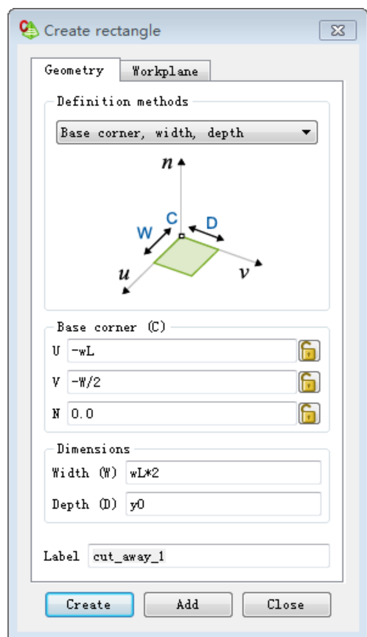


图 10-27　创建 cut_away_1

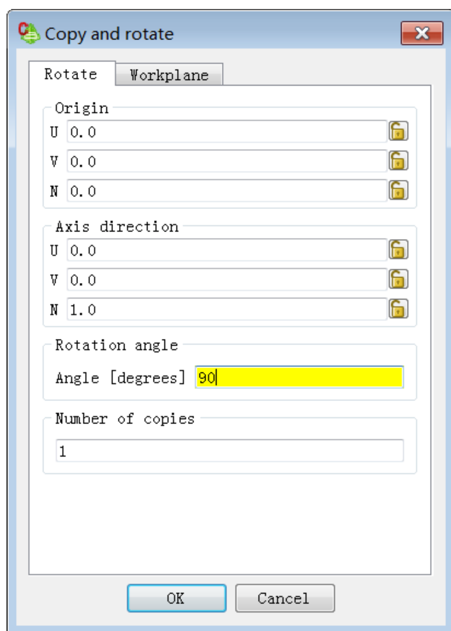


图 10-28　通过选择 cut_away_1 创建 cut_away_2

同时选中“cut_away_1”与“cut_away_2”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Subtract from”选项，再单击“patch”模型，重命名布尔减运算后的模型为“slottedPatch”。

在“Construct”菜单中，在“Create surface”中选择“Rectangle”，弹出“Create rectangle”对话框，进行如下设置。

Base corner(C)：(U：−wL/2, V：−w/2, N：0.0)。

Width (W)：wL, Depth(D)：y0。

Label：feed_1。

单击“Create”按钮，创建“feed_1”，如图 10-29 所示。

选中模型“feed_1”，单击鼠标右键，选择“Coply special”→“and rotation”选项，弹出“Copy and rotate”对话框，设置“Angle[degrees]”为 90，其他设置不变，单击“OK”按钮，创建新模型为 feed_2，如图 10-29 所示。

将创建的模型“feed_1”“feed_2”“slottedPatch”全部选中，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，进行合并操作，将新模型重命名为“fedPatch”。

（2）创建端口

按照本章之前介绍的方法在图 10-30 所示的相应棱边上依次创建“Microstrip port”：Port1 和 Port2。

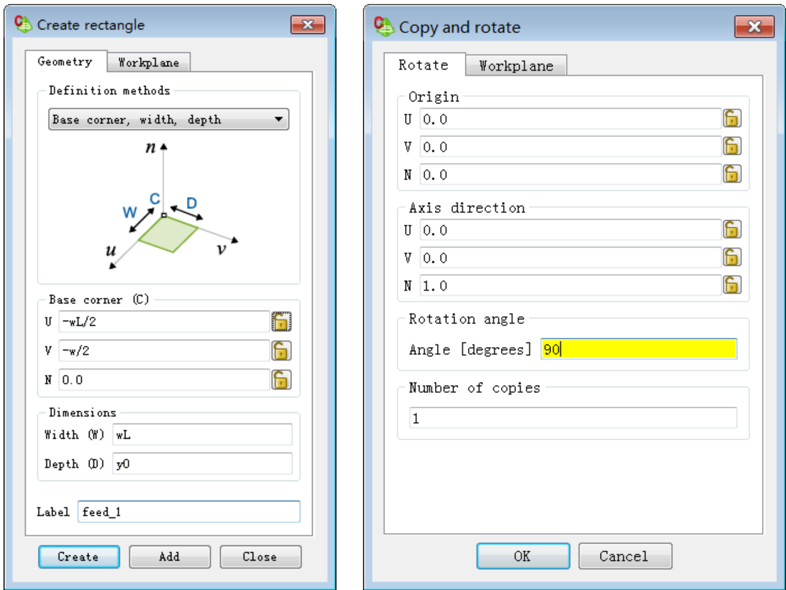


图 10-29　feed_1 的几何参数（左）与旋转 feed_1 创建 feed_2（右）

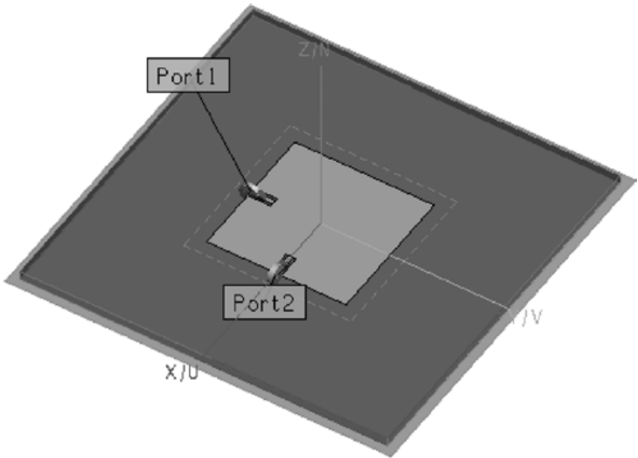


图 10-30　创建“Microstrip port”：Port1 和 Port2

（3）求解设置

左侧的树形浏览器中，切换到“Configuration”选项卡，展开“Global”结点，单击鼠标右键，选择“Network”→“Network”选项，如图 10-31 所示，弹出“Add general network”对话框来定义非辐射网络，具体设置如下。

Data type：S-matrix。

Source：Touchstone file。

Number of network terminals：3。

单击“Browser”按钮选择本章前一个例子生成的端口 3 网络的 S 参数文件。

Filename：feedNetwork_SParameter1.s3p。

Label：GeneralNetwork1，如图 10-32 所示。

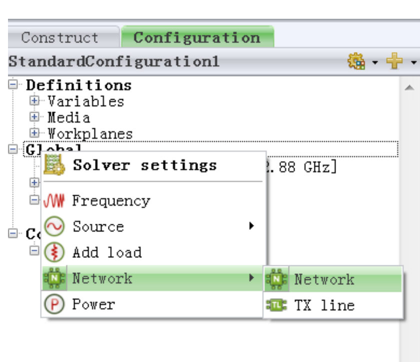


图 10-31　创建非辐射网络

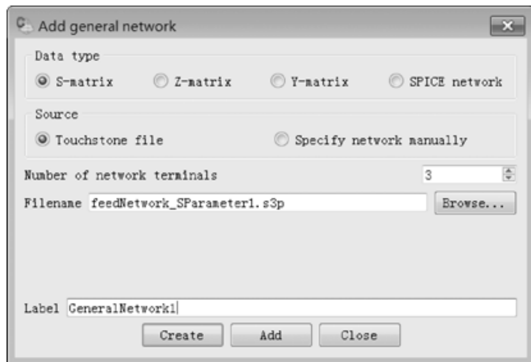


图 10-32　设置非辐射网络参数

在“View”菜单中单击“Schematic”→“Network schematic”，如图 10-33 所示，进入电路编辑窗口。连接“GeneralNetwork1”的端口 2 与贴片天线的“Port1”，连接“GeneralNetwork1”的端口 3 与贴片天线的“Port2”，如图 10-34 所示。

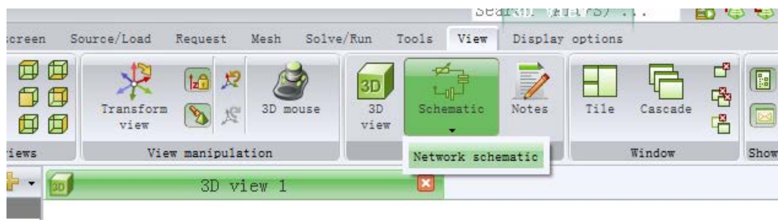


图 10-33　进入“Network schmatic”电路编辑窗口

（4）设置激励

选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Add voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，进行如下设置。

Port：GeneralNetwork1.Port1。

其他采用默认设置，单击“Create”按钮，创建 VoltageSource1，如图 10-35 所示。

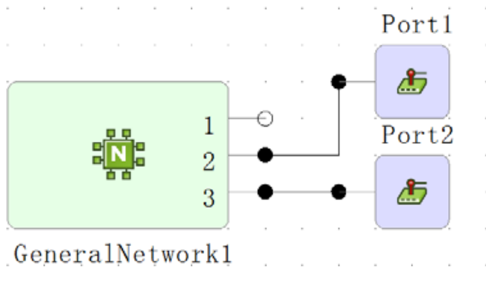


图 10-34　“Network schmatic”电路编辑窗口

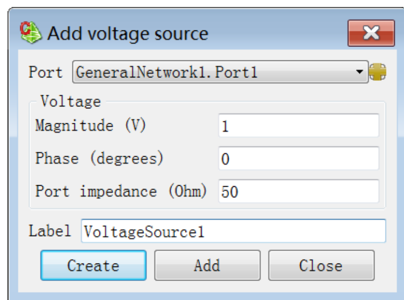


图 10-35　为“GeneralNetwork1.Port1”添加电压源

（5）设置求解参数

展开“Configuration specific”结点，选中“Request”并单击鼠标右键，选择“Far field”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

Start：(θ：−85, φ：0.0); End：(θ：85, φ：0.0)。

Increment：(θ：5, φ：0.0)。

单击“Create”按钮，如图 10-36 所示。

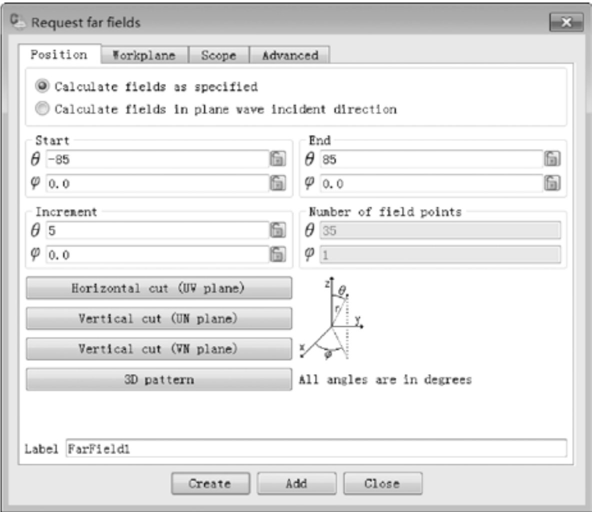


图 10-36　设置远场定义

（6）剖分网格

进入“Mesh”菜单，单击“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，将“Mesh size”设置为“Standard”，单击“Create”按钮生成网格。

（7）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（8）后处理结果显示

在 CADFEKO 中单击“POSTFEKO”按钮，启动 POSTFEKO。

在 POSTFEKO 中得到非辐射网络端口 1 阻抗的实部和虚部，如图 10-37 所示。

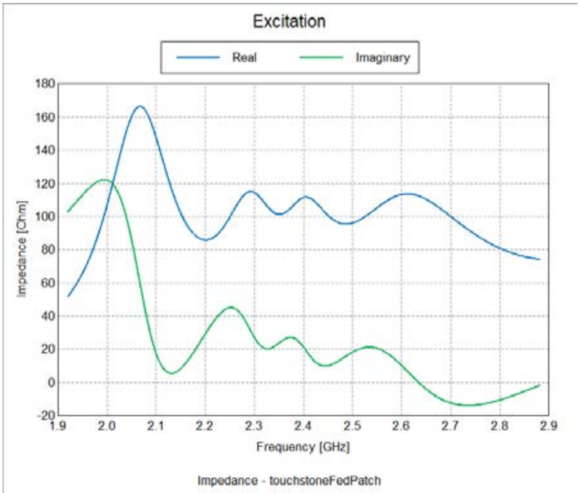


图 10-37　馈电网络端口 1 阻抗的实部与虚部

3. 全模型计算

将工程“touchstoneFedPatch.cfx”另存为工程“completePatch.cfx”。删除电压激励与非辐射网络的定义；关闭“Network schmatic”视图；删除端口：Port1 和 Port2。

（1）模型读入

在“Home”菜单中，单击“Import”→“CADFEKO model（*.cfx）”，选择工程文件“feedNetwork.cfx”，在导入对话框中选择导入几何和网格规则，以及合并变量和材料，单击“Import”按钮进行导入。

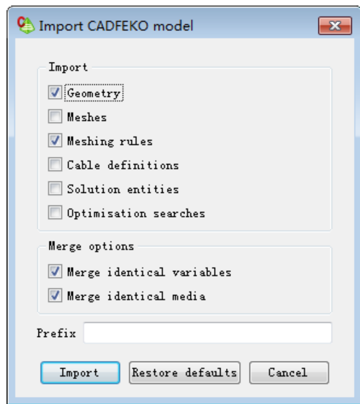


图 10-38　导入*.cfx 文件“feedNetwork.cfx”

删除 Port2 和 Port3，保留 Port1 和 Port4（外部 Port），同时选中两个模型“fedPatch”和“feed_network”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，进行模型并操作，新生成的模型为“Union1”。

（2）端口加载和激励

在左侧的树形浏览器中选择“Configuration”选项卡，选中“Global”结点，单击鼠标右键，选择“Add load”选项，为 Port4 添加 120Ohm 的负载。

在“Global”结点中，双击“Sources”结点，弹出“Add voltage source”对话框，为 Port1 添加电压源激励 source。

（3）网格生成与提交计算

在“Mesh”菜单中单击“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，将“Mesh size”设置为“Standard”，单击“Mesh”按钮生成网格。

在“Solve/Run”菜单中单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（4）后处理显示计算结果

在 POSTFEKO 中得到 Port1 的阻抗，并与采用非辐射馈电网络的计算结果进行对比，如图 10-39 所示。

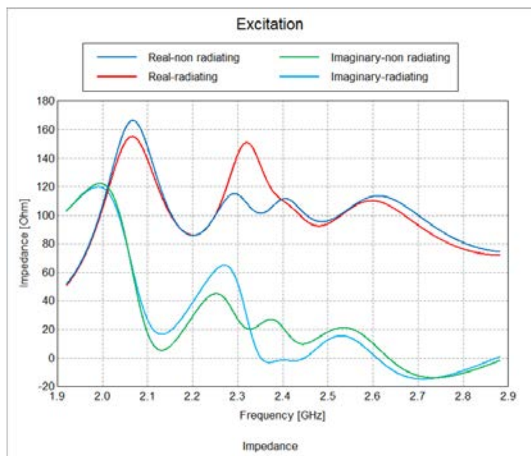


图 10-39　非辐射网络与全模型计算端口阻抗对比

10.1.2 传输线网络的级联

本节采用非辐射传输线模拟对数周期天线（LPDA）的馈电结构。LPDA 的中心频率是 46.29MHz，工作带宽为 35～60MHz。LPDA 模型如图 10-40 所示。

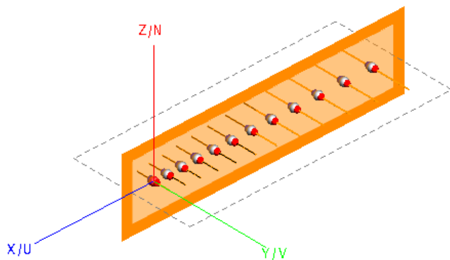


图 10-40　LPDA 模型

启动 CADFEKO，新建一个工程“Log_Periodic_Network_Load.cfx”。设置单位为 m（米）。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

中心频率：freq = 46.29e6。

增长因子：tau = 0.93。

间隔距离：sigma0 = 0.7。

第一个振子长度：len0 = 2。

第一个振子位置：d0 = 0。

第一个振子半径：rad0 = 0.00667。

sigma1. . . sigma11：sigmaN = sigma(N−1)/tau。

d1. . . d11：dN = d(N−1) – sigmaN。

len1. . . len11：lenN = len(N−1)/tau。

rad1. . . rad11：radN = rad(N−1)/tau。

自由空间波长：lambda = c0/freq。

传输线阻抗：Zline = 50。

终端复杂阻抗：Zload = 50。

（2）模型创建

依次创建 12 个偶极子模型，单击“Construct”→“Create curve”→“Line”，其中 N 为 0,1,2,3…11。

Start point：(U：dN，V：−lenN/2，N：0.0)。

End point：(U：dN，V：lenN/2，N：0.0)。

为每个振子设置局部半径为 rad0～rad12。

（3）创建端口

依次在 12 个振子的中心位置创建 wire port，Port0～Port11。

（4）非辐射传输线网络

切换到“Configuration”选项卡，右键单击“Global”结点，选择“Network”→“TX line”选项，定义 11 个非辐射传输线网络，具体设置如下：

Definition methods：Z0，length，attenuation。

Transmission line length：分别为 sigma1，sigma2，sigma3…sigma11。

Real part of Z0（Ohm）：Zline。

Imaginary part of Z0（Ohm）：0。

Attenuation（dB/m）：0。

勾选：Cross input and output ports。

Label：分别为“TransmissionLine1”“TransmissionLine2”…“TransmissionLine11”，如图 10-41 所示。

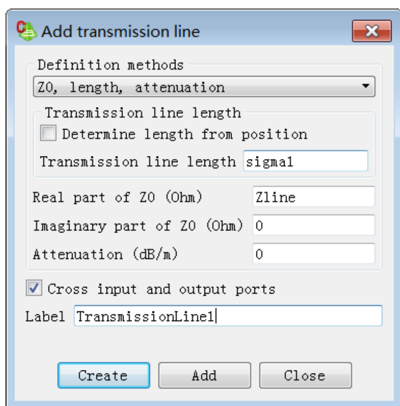


图 10-41　定义传输线 TransmissionLine1

在“Configuration”选项卡中，右键单击“Global”结点，选择“Network”→“Network”选项，定义 1 个非辐射负载。选中“Y-matrix”和“Speicfy network manually”两个单选按钮，定义 Y 矩阵为 1/Zload+j0，如图 10-42 所示。

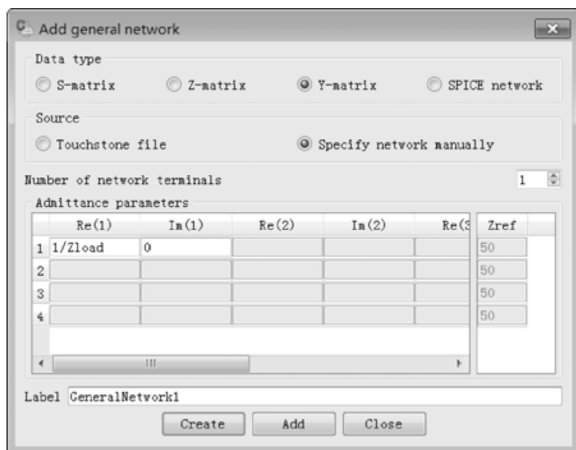


图 10-42　定义负载非辐射网络

在“View”菜单中选择“Schematic”，进入电路编辑窗口。连接 12 个非辐射网络与 12 个天线端口，如图 10-43 所示。

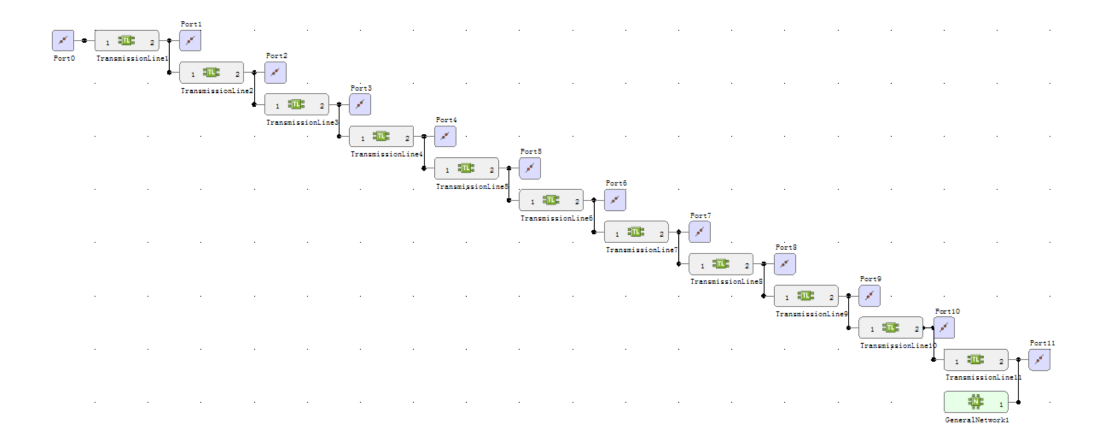


图 10-43 非辐射网络的连接方式

设置频率定义，选择连续扫频“Continuous (interpolated) range”，为 35e6~60e6。

在 Port0 上添加一个电压源（见图 10-44）：在“Request”中，定义两个远场。“ffUN”，定义在 UN 平面，采样间隔 theta 设置为 2°，“ffUV”，定义在 UV 平面，采样间隔 phi 设置为 2°。同时定义“Currents”。在“Create mesh”对话框中设置网格尺寸“Mesh size”为“Standard”，“Global wire radius”可任意定义，因为在每个振子属性中已经设置了具备的半径。剖分完网格，运行求解器计算。

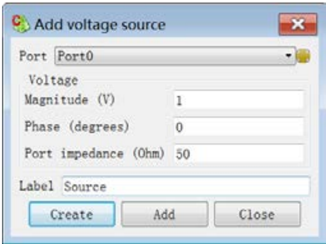


图 10-44 为 Port0 添加电压源

垂直增益方向图及天线的输入阻抗如图 10-45 和图 10-46 所示。

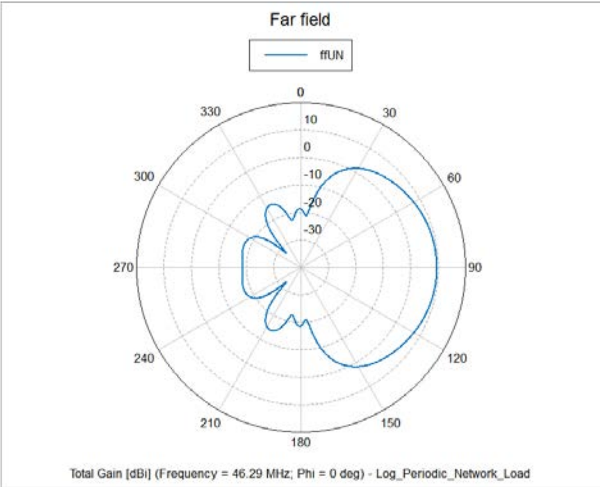


图 10-45 垂直增益方向图（46.29MHz）

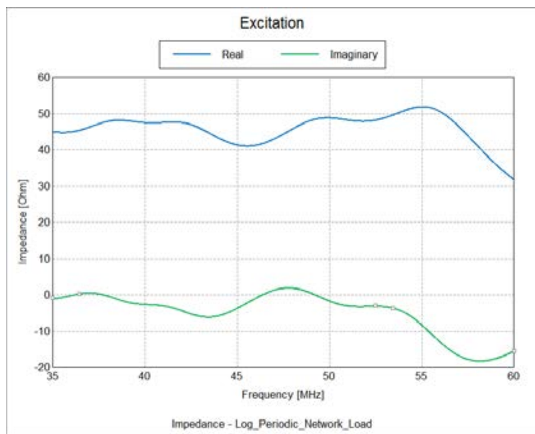


图 10-46　天线的输入阻抗曲线实部与虚部

10.1.3 天线匹配网络与天线的一体化仿真

天线效率和带宽是天线设计的一项重要指标。通常可以通过设计天线物理结构以及天线匹配电路来提升天线的效率和带宽。FEKO 通过非辐射网络来模拟天线的匹配电路以实现天线匹配网络与天线的一体化仿真。Optenni Lab 软件是一款天线匹配电路快速设计软件，可实现自动优化并设计天线匹配电路。使用者只需要指定期望的频率范围及使用的器件数目，便可通过 Optenni Lab 软件设计出最优的匹配电路。Optenni Lab 软件应用主流器件厂商的器件模型，设计的匹配电路考虑了器件损耗以及器件的寄生参数影响。本节采用 Optenni Lab 软件设计天线匹配电路，并应用 FEKO 实现匹配网络与天线一体化仿真。

本案例是设计一款数字视频广播（DVB）接收天线，要求覆盖 VHF-III（170～230MHz）及 UHF-IV/V（470～862MHz）频段。天线类型选择为双频段对数周期天线（参考随书链接资源中的天线工程文件“…/chapter10/app1_3/DVB_antenna.cfx”）。图 10-47 所示是天线模型及其端口 S 参数。由于该天线的端口阻抗大致在 200Ohm 左右，因此对于 50Ohm 的系统需要设计匹配电路。未匹配的对数周期天线端口反射系数如图 10-48 所示。

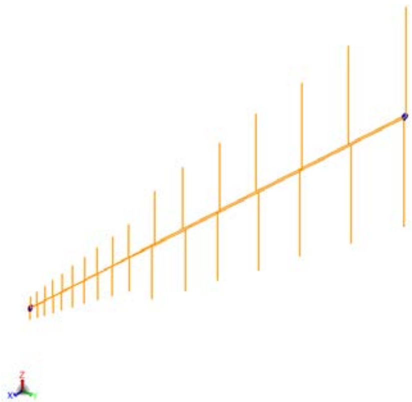


图 10-47　双频带对数周期天线

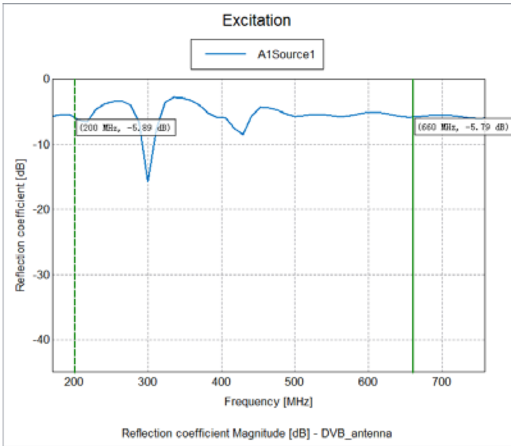


图 10-48　未匹配的对数周期天线端口反射系数

采用 Optenni Lab 软件选择 6 个器件进行匹配电路设计。图 10-49 所示是软件给出的最佳电路。

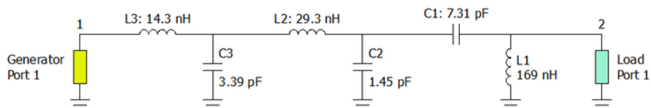


图 10-49　匹配电路

Optenni Lab 软件将导出匹配电路的 S 参数文件，本例中为“match_circuit.s2p”（参考随书链接资源中的匹配电路文件“.../chapter10/app1_3/match_circuit.s2p”）。

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中切换到“Configuration”选项卡，选中“Global”结点并单击鼠标右键，选择“Network”→“Network”选项，如图 10-50 所示，弹出“Add general network”对话框，定义非辐射网络，设置如下。

Data type：S-matrix。

Source：Touchstone file。

Number of network terminals：2。

Filename：match_ciricuit.s2p。

Label：GeneralNetwork1，如图 10-51 所示。

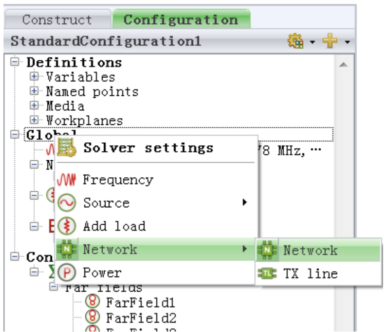


图 10-50　创建匹配电路的非辐射网络

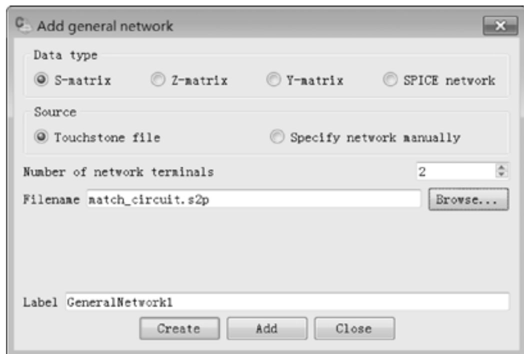


图 10-51　选择 S 参数文件定义匹配电路的非辐射网络

在“View”菜单中单击“Schematic”按钮，进入电路编辑窗口。连接“General Network1”的端口 2 与 Port1，如图 10-52 所示。

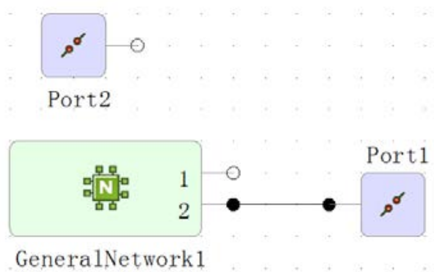


图 10-52　“Network schmatic”电路编辑窗口

为端口“GeneralNetwork1.Port1”添加“Voltage source”。这样匹配电路与天线的激励端口 Port1 相连，Port2 为 LPDA 的负载端口。电压激励添加在非辐射网络“GeneralNetwork1.Port1”上，实现天线匹配网络与天线一体化仿真，匹配前后端口的反射系数如图 10-53 所示。

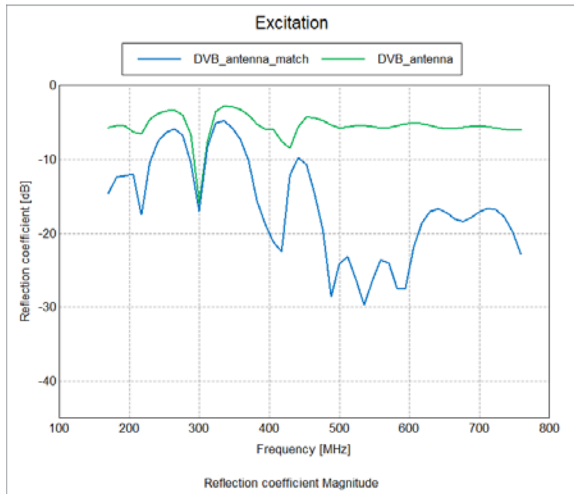


图 10-53　匹配前后端口的反射系数

10.2 天线优化设计

10.2.1 常用的优化技术

在 FEKO 中任何的变量均可作为参数进行优化，包括模型的几何尺寸、负载、激励源的幅度和相位，也可以定义变量的表达式等。FEKO 中除了使用网格搜索法（Grid search）进行参数扫描外，还包括以下 3 种常用的优化算法。

1）Simplex Nelder-Mead：下山单纯形优化算法，用于优化多维无约束问题的一种数值优化方法。初始值将很大程度地影响最终的优化结果。

2）Genetic Algorithm：遗传算法。遗传算法把问题的解表示成“染色体”，在算法中用一系列编码的串来表示。在执行遗传算法之前，给出一群初代的“染色体”，即假设解。然后把这些假设解置于问题的“环境”中，并按适者生存的原则，从中选择出较适应环境的“染色体”进行复制，再通过交叉、变异等一系列的过程，产生更适应环境的新一代“染色体”群。这样，一代一代地进化，最后就会收敛出最适应环境的一个“染色体”，即问题的最优解。

3）Particle Swarm：粒子群优化算法，该方法是一种基于迭代的优化工具。系统初始化为一组随机解，即一群随机粒子，通过迭代搜寻最优值。每个优化问题的解都是搜索空间中的一只鸟，称为“粒子”。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值（fitness value），每个粒子还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离。然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索。在每一次迭代中，粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。

10.2.2 FEKO软件的仿真实现

本节采用 FEKO 的优化算法优化一个 3dB 微带分支耦合器，演示 FEKO 的优化实现方法。工作频率为 2.8~3.2GHz，优化目标为 S21=S41=-3dB。首选参数化建模，通过优化算法得到精确的微带线的宽度和长度。微带分支耦合器示意图如图 10-54 所示。

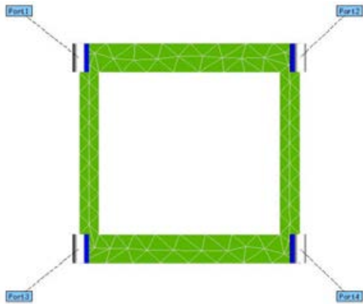


图 10-54　微带分支耦合器示意图

（1）模型创建

启动 CADFEKO，新建一个工程“branch_coupler.cfx”。设置长度单位为 mm（毫米）。

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

freq = 3e9。

lam0 = 1000*c0/freq。

epsr = 1.1。

h = 0.5。

lamd = lam0/sqrt(epsr)。

edge_meshing = lamd/33。

port_edge_meshing = lamd/15。

wZ0 = 2.32。

wZ1 = 3.71。

z0_len_scal = 0.8。

z0_line_len = z0_len_scal*lam0/4。

z1_len_scal = 0.8。

z1_line_len = z1_len_scal*lam0/4。

（2）定义介质材料

双击树形浏览器中的“Media”结点，创建介质材料“foam”，定义“Relative permittivity”为“epsr”、“Dielectric loss tangent”为 0。

（3）创建模型

在“Construct”菜单中，单击“Create surface”中的“Polygon”，弹出“Create polygon”对话框，创建 Polygon_inner，具体设置如下。

在“Geometry”选项卡中：

Corner 1：(U：wZ0, V：−wZ1, N：0)。

Corner 2：(U：wZ0,V：−wZ1−z0_line_len , N：0)。

Corner 3：(U：wZ0+z1_line_len,V：−wZ1−z0_line_len , N：0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 4：(U：wZ0+z1_line_len,V：−wZ1, N：0)。

Label：Polygon_inner，如图 10-55 所示。

单击下边的“Add”按钮，继续设置。

Corner 1：(U：0, V：−wZ1−z0_line_len, N：0)。

Corner 2：(U：0,V：−2*wZ1−z0_line_len , N：0)。

Corner 3：(U：2*wZ0+z1_line_len, V：−2*wZ1−z0_line_len , N：0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 4：(U：2*wZ0+z1_line_len,V：−wZ1−z0_line_len, N：0)，如图 10-56 所示。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 5：(U：2*wZ0+z1_line_len,V：−wZ1, N：0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 6：(U：2*wZ0+z1_line_len,V：0, N：0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

Corner 7：(U：0,V：0, N：0)。

单击中部的“Add”按钮，继续设置。

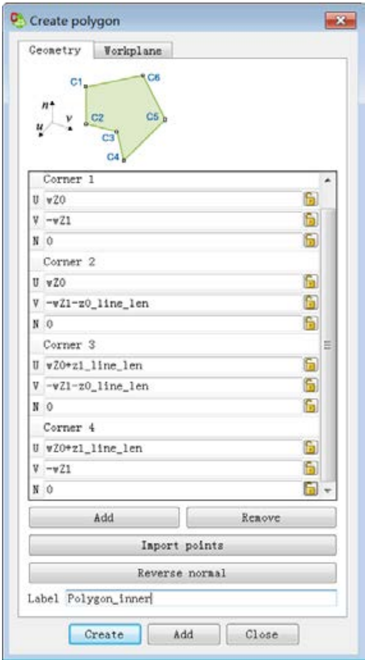


图 10-55　Polygon_inner 参数

Corner 8：(U：0,V：−wZ1, N：0)。

Label：Polygon_outter。

单击下方的“Create”按钮，如图 10-56 所示。

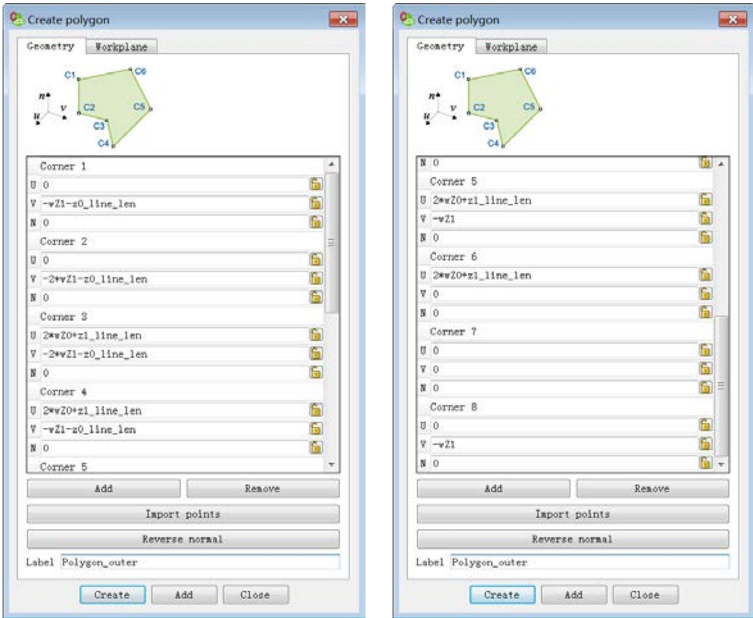


图 10-56　Polygon_outer 参数（左图：Corner 1～Corner 4，右图：Corner 5～Corner 8）

选中模型“Polygon_inner”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Substract from”→“Polygon_outer”选项，重新命名模型为“branch_line”。

（4）定义无限大介质平面

在“Construct”菜单中单击“Planes/arrays”按钮下的“Plane/ground”，在“Plane/ground”对话框中按照图 10-57 所示进行设置。

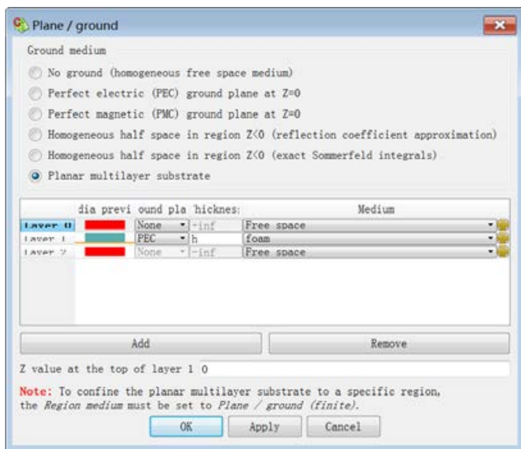


图 10-57　无限大介质平面设置

选中图 10-58 所示的边，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Microstrip port”选项，如图 10-58 所示。在打开的“Create microstrip port (geo metry)”对话框中创建 Port1，设置如图 10-59 所示。

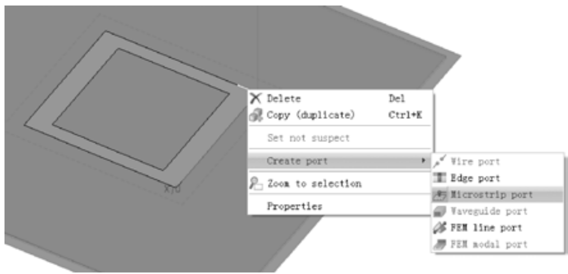


图 10-58　选择 Port1 的边

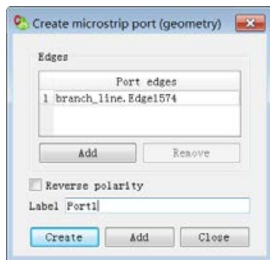


图 10-59　创建 Port1

按照图 10-60 所示依次创建 Port2、Port3、Port4。

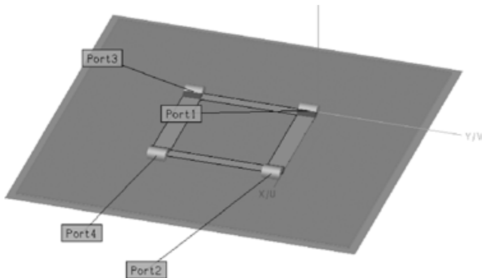


图 10-60　依次创建 Port2、Port3、Port4

（5）定义计算频率

打开“Solution frequency”对话框，选择“Linearly spaced discrete points”选项，其他设置如下。

Start frequency(Hz)：2.8e9。

End frequency (Hz)：3.2e9。

Number of frequencies：5，如图 10-61 所示。

（6）定义 S 参数计算

右键单击“Request”结点，选择“Multiport S-parameters”选项，在打开的“Request S-parameters”对话框中添加 Port2、Port3、Port4，只保留 Port1 为“Active”，如图 10-62 所示。

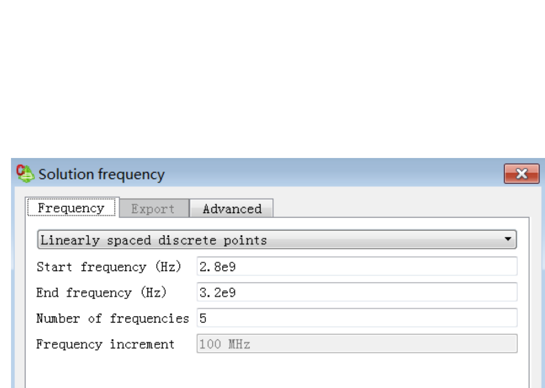


图 10-61 定义计算频率

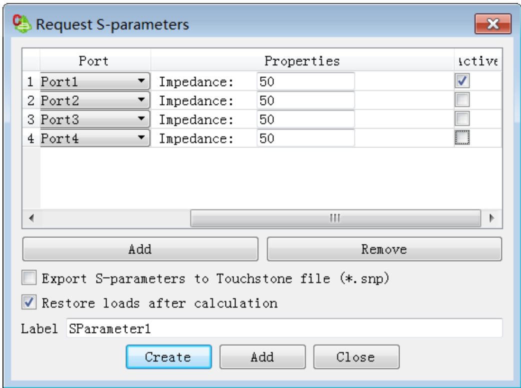


图 10-62 定义 S 参数计算

（7）优化设置

进入“Request”菜单，在“Optimisation”中单击“Add search”，如图 10-63 所示，在“Add optimisation search”对话框中选择“Simplex (Nelder-Mead）”选项，并选中“Low(faster)”单选按钮，如图 10-64 所示。

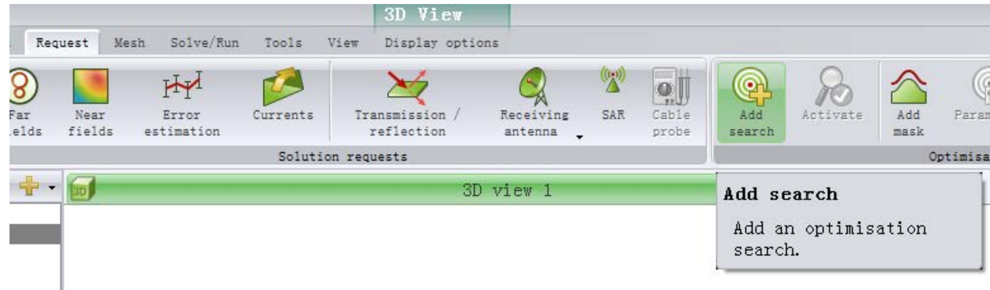


图 10-63 添加优化设置

在左侧的树形浏览器中的“Construct”选项卡中，展开“Optimisation”→“Search1”结点，双击“Parameters”，弹出“Optimisation parameters”对话框，按照图 10-65 所示设置自变量及其取值范围。

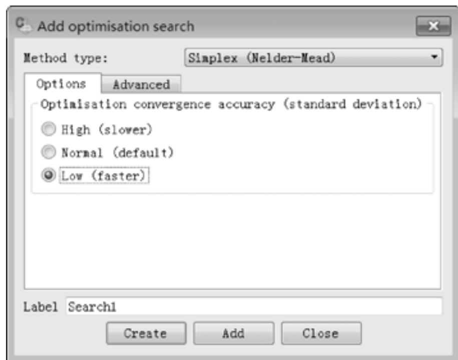


图 10-64　优化方法和精度设置

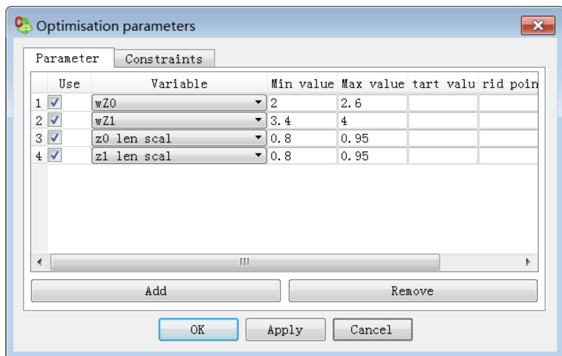


图 10-65　定义优化参数

右键单击“Goals”结点，选择“S-matrix goal”选项，弹出“Create S-parameter goal”对话框，定义目标如下。

S-parameter label：SParameter1。

Quantity：Coupling coefficient(Smn)。

Expression：(log(mag(Focus)))*(20)。

Label：S21。

单击“Create”按钮，如图 10-66 所示。

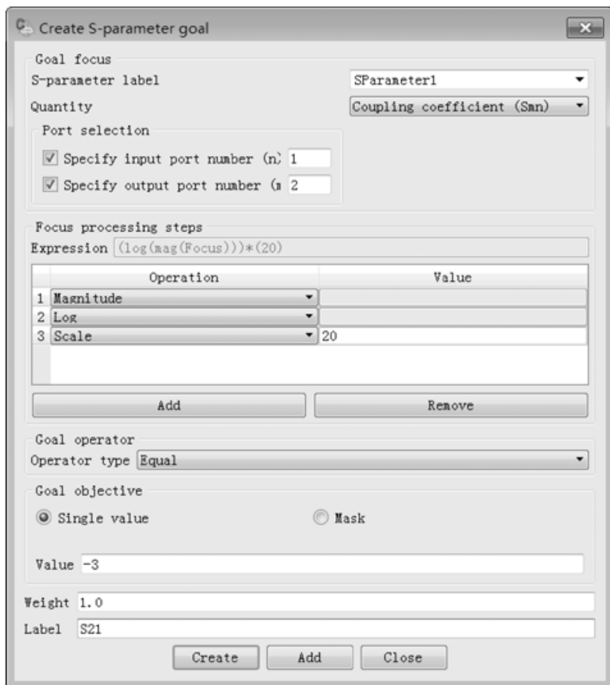


图 10-66　优化目标 S21 定义

选中新建的优化目标 S21 并单击鼠标右键，选择“Copy(duplicate)”选项，双击“S21_1[1]”，修改“Specify output port number (m)”为“4”，设置“Label”为“S41”，如图 10-68 所示。

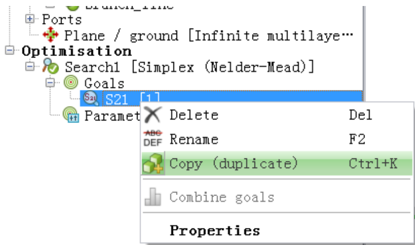


图 10-67　复制优化目标 S21

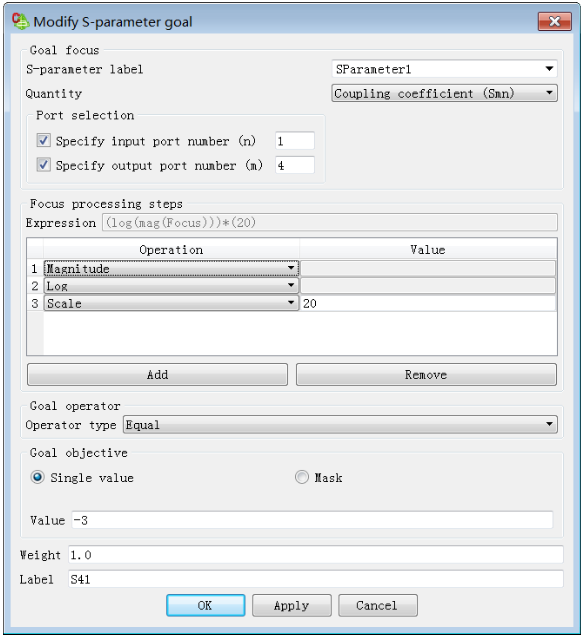


图 10-68　修改为优化目标 S41

创建变量“tL0=min(lamd/10,min(wZ0,wZ1)/1.2)”，在“Create mesh”对话框中设置“Mesh size”为“Custom”、“Triangle edge length”为“tL0”，单击“Store settings”按钮，再单击“Mesh”按钮生成网格。

在“Solve/Run”菜单中，选择“Component launch options”，如图 10-69 所示，打开“Component launch options”对话框，设置不保存优化中间过程的工程文件。在“Utilities”选项卡中勾选“Delete all files (except optimum)”复选框，如图 10-70 所示。

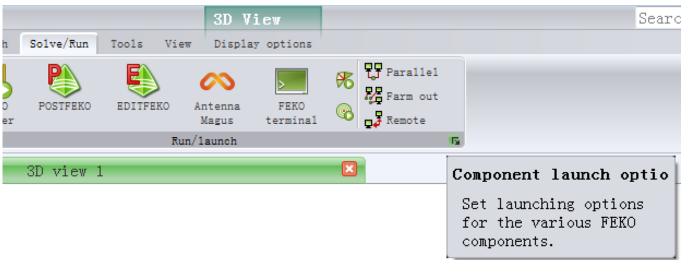


图 10-69　打开“Component launch options”对话框

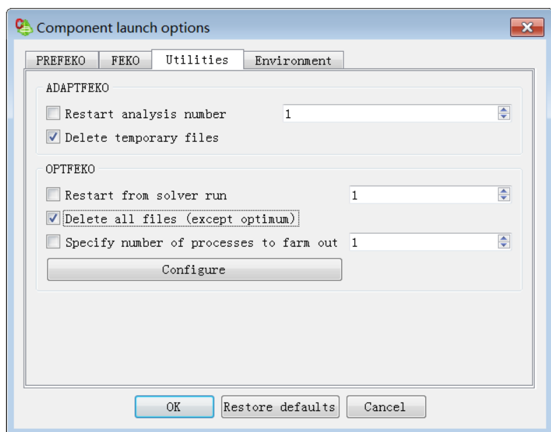


图 10–70　勾选“Delete all files (except optimum)”复选框

（8）优化计算

在“Solve/Run”菜单单击“OPTFEKO”按钮提交优化计算，如图 10–71 所示。运行结束后启动 POSTFEKO 查看结果。

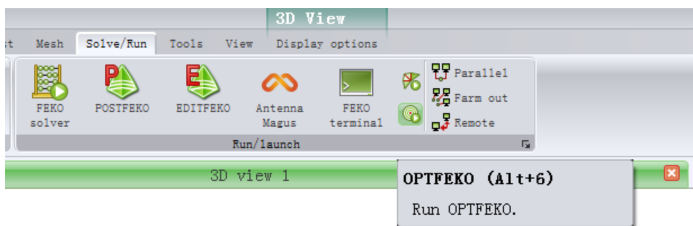


图 10–71　运行 OPTFEKO

在 POSTFEKO 中，观测 S21 曲线得到最优结果，如图 10–72 所示。同样，在“branch_coupler.log”文件中列出了优化后的参数，如图 10–73 所示。

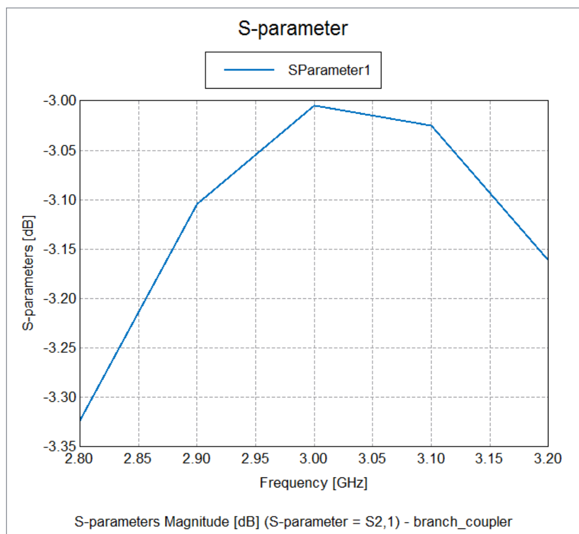


图 10–72　优化后的 S21

```
=============== SIMPLEX NELDER-MEAD: Finished ===============

Optimisation finished (Standard deviation small enough:   7.830495402e-03)

Optimum found for these parameters:
  wz0                            =    2.370395224e+00
  wz1                            =    3.722521414e+00
  z0_len_scal                    =    8.676063668e-01
  z1_len_scal                    =    8.690480021e-01

Optimum aim function value (at no. 30):    9.680179948e-01
No. of the last analysis: 31
```

图 10-73　优化后的.log 文件

最终尺寸的工程文件自动保存为“branch_coupler_optimum.cfx”，其中包含了所有的计算结果。

10.3　天线特征模分析（CMA）

随着通信技术的快速发展，人们对天线的设计提出了越来越多的要求，包括各种贴片天线、微带天线等，利用数值方法分析微带天线，缺乏一个清晰的物理解释，不能给出明确的工作机理和设计指导。

特征模（Characteristic Mode Analysis）是结合解析本征模理论和数值矩量法两者的优点提出的一种解决方法，概念清晰，可以精确地获得电磁问题的解。

FEKO 是最早把 CMA 技术商业化的软件，早在 2012 年的 FEKO 6.2 版本便发布了 CMA 求解器，采用了最先进的模式跟踪技术（Mode Tracking），提供了丰富的工程应用参数，已经成功应用于天线设计、天线布局以及散射等领域。

10.3.1　CMA理论背景

特征模方法（CMA）为任意形状的电磁物体定义了一系列正交的特征电流，这些特征电流是该电磁物体本身的固有属性，因此可以从本质上解释器辐射特性。这些本征模式之间具有正交性和收敛性。

特征模分析对天线的分析与设计具有指导性意义，其基本原理与思路如下：

1）基于矩量法（MoM）得到电磁问题的阻抗矩阵（Impedance Matrix），其对应本征值方程为：$[X][I]_n = \lambda_n[R][I]_n$，其中 R 和 X 分别为阻抗矩阵的实部和虚部。

2）根据广义特征值及 R、X 的性质，求出特征值 λ_n 和特征电流 I。

3）根据本征值和特征电流值，计算不同模式的电流分布、远场特征和近场特征等。

利用 FEKO 的特征模分析工具可以得到以下重要参数，并进行扫频计算，进而跟踪模式的变化。

1）本征值，描述模式的谐振行为：

λ_n<0 表示该模式为容性，储备电能。

λ_n>0 表示该模式为感性，储备磁能。

λ_n=0 表示该模式为谐振模式。

2）特征角（Characteristic Angle(a_n)）：$a_n = 180° - \tan^{-1}\lambda_n$。

3）模式权重系数（MS−Modal Significance），该值越大表示该模式越容易激发出来，具体计算公式为

$$\mathrm{MS} = \frac{1}{|1 + j\lambda_n|}$$

4）模式激励系数（MEC−Modal excitation coefficient）：$V_n = \oint E^i gJ_n \mathrm{d}s$。

5）模式电流加权系数（MWC−Modal Weighting coefficient）：$\alpha_n = \frac{V_n}{1 + j\lambda_n}$，值与本征值有关，可以适当选择激励，以激励起某些需要的模式，抑制不需要的模式。本征值越小，展开系数 α_n 越大，该模式对总电流的贡献越大。

10.3.2　FEKO天线特征模分析的仿真实现

本节将介绍如何利用 FEKO 的 CMA 技术进行 MIMO 天线的快速设计。椭圆圆环型结构天线如图 10−74 所示。

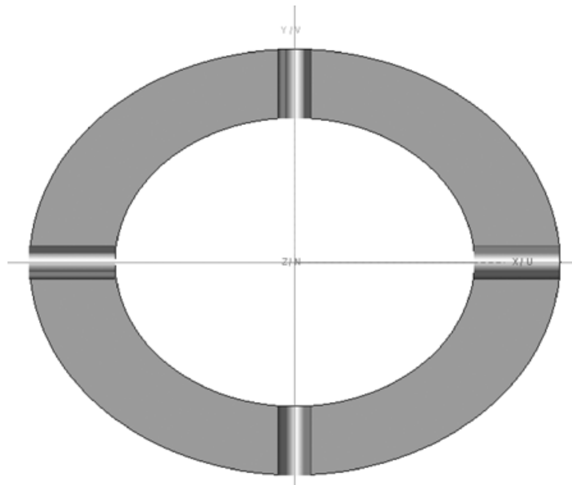


图 10−74　MIMO 天线结构

启动 CADFEKO，新建一个工程“MIMO_ring.cfx”。

在“Home”菜单中，单击“Model Unit”按钮，弹出“Model Unit”对话框，设置长度单位为 mm（毫米）。

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中，展开“Definitions”结点，双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

中心工作频率：freq = 2.4e9。

金属椭圆环内部 U 轴半径：rInU=21。

金属椭圆环内部 V 轴半径：rInV=rInU*0.8。

金属椭圆环外部 U 轴半径：rOutU=31。

金属椭圆环外部 U 轴半径：rOutV=rOutU*0.8。

（2）模型创建

单击“Construct”菜单中的“Elliptic arc”按钮，弹出“Create elliptic arc”对话框，进行如下设置。

Centre point(C)：(U：0.0，V：0.0，N：0.0)。

Radius(Ru)：rOutU；Radius(Rv)：rOutV。

Start angle(A0)：0.0；End angle(A1)：90。

Label：EllipticArc1。

单击“Add”按钮，继续设置。

Radius(Ru)：rInU；Radius(Rv)：rInV。

Label：EllipticArc2。

单击“Create”，如图 10-75 所示。

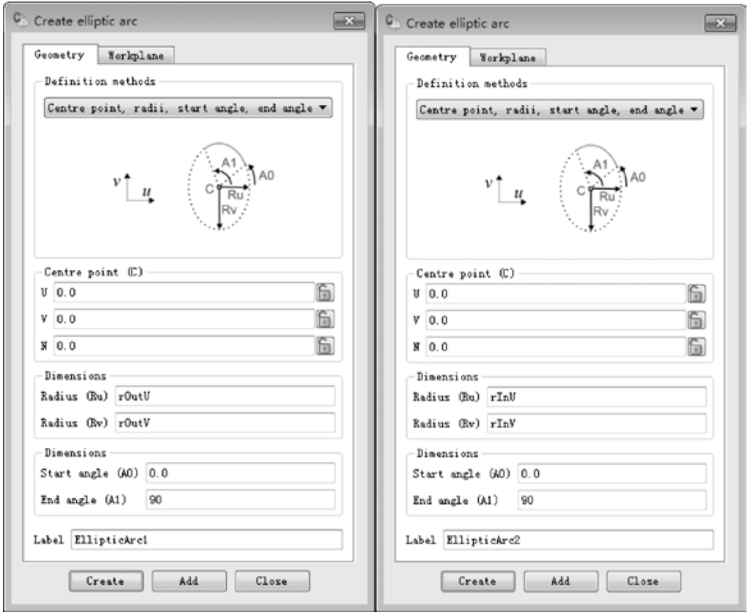


图 10-75 模型创建设置

在左侧的树形浏览器中，在“Construct”选项卡中，展开“Model”→“Geometry”结点，同时选中新创建的“EllipticArc1”和“EllipticArc2”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Loft”选项，弹出“Create loft”对话框，采用默认设置，把新生成的模型更名为“sector_1”。

选中模型“sector_1”，单击鼠标右键，选择“Copy Special”→“and Mirror”选项，弹出“Copy and mirror”对话框，进行如下设置。

Plane：UN。

单击“OK”按钮。

把新生成的模型更名为“sector_2”。

同时选中模型“sector_1”和“sector_2”，单击鼠标右键，选择“Copy Special”→“and Mirror”选项，弹出“Copy and mirror”对话框，进行如下设置。

Plane：VN。

单击“OK”按钮，如图 10-76 所示。

同时选中模型“sector_1”“sector_2”“sector_3”和“sector_4”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Union”选项，把新生成的模型更名为“MiMO_ant”。

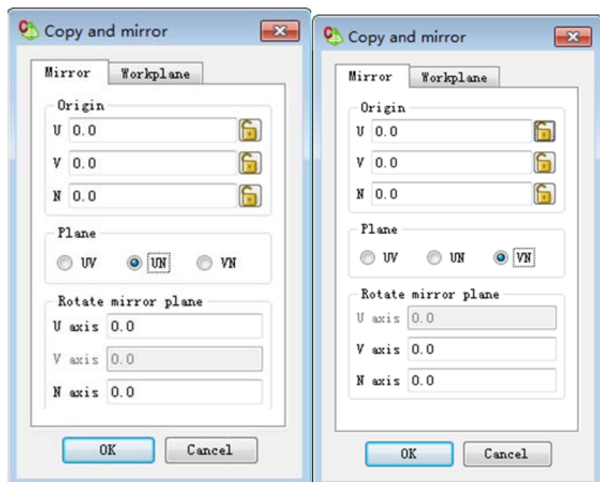


图 10-76　模型镜像与复制

（3）创建端口

进入“View”菜单，单击“Top”按钮，在 3D 视图中，模型显示如图 10-77 所示，点选左侧的水平棱边（单击多次，选择模式自动切换，切换到棱边选择模式），单击鼠标右键，选择“Create port”→“Edge port”选项，弹出“Create edge port(geometry)”对话框。

在“Positive faces”区域内，选中该棱边下边的面元“MiMo_ant.Face1_2”（面元的名称与操作时的面元编号可能不同，应与操作时所用的面元对应），单击“Move to negtive faces”按钮。

Label：Port_West。

单击“Create”按钮，如图 10-77 所示。

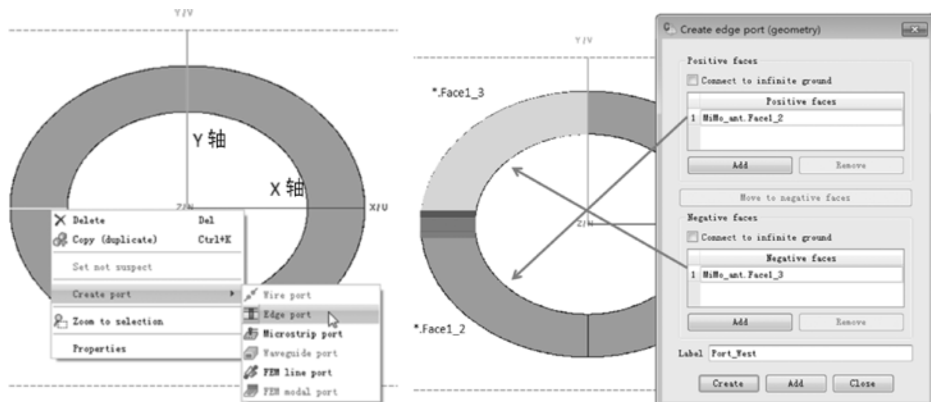


图 10-77　定义端口“Port_West”

在 3D 视图中，模型显示如图 10−78 所示，点选右侧的水平棱边，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Edge port”选项，弹出“Create edge port(geometry)”对话框。

在“Positive faces”区域内，选中该棱边上边的面元“MiMo_ant.Face1_1”（面元的名称与操作时的面元编号可能不同，应与操作时所用的面元对应），单击“Move to negtive faces”按钮。

Label：Port_East。

单击“Create”按钮，如图 10−78 所示。

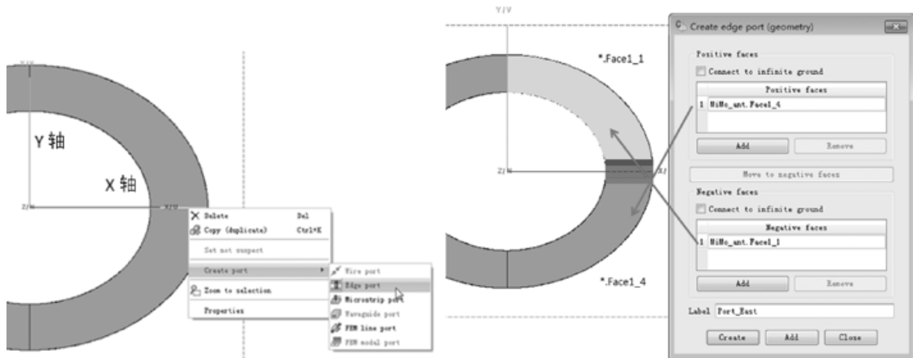


图 10−78　定义端口“Port_East”

在 3D 视图中，模型显示如图 10−79 所示，点选下侧的垂直棱边，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Edge port”选项，弹出“Create edge port（geometry）”对话框。

在“Positive faces”区域内，选中该棱边右侧的面元“MiMo_ant.Face1_4”（面元的名称与操作时的面元编号可能不同，应与操作时所用的面元对应），单击“Move to negtive faces”按钮。

Label：Port_South。

单击“Create”按钮，如图 10−79 所示。

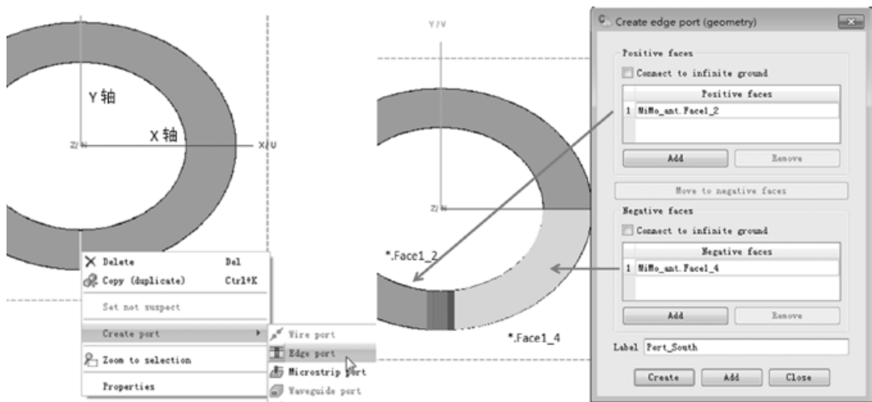


图 10−79　定义端口“Port_South”

在 3D 视图中，模型显示如图 10−80 所示，点选上侧的垂直棱边，单击鼠标右键，选择“Create port”→“Edge port”选项，弹出“Create edge port（geometry）”对话框。

在“Positive faces”区域内，选中该棱边左侧的面元“MiMo_ant.Face1_3”（面元的名称与操作时的面元编号可能不同，应与操作所用的面元对应），单击“Move to negtive faces”按钮。

Label：Port_North。

单击“Create”按钮，如图 10-80 所示。

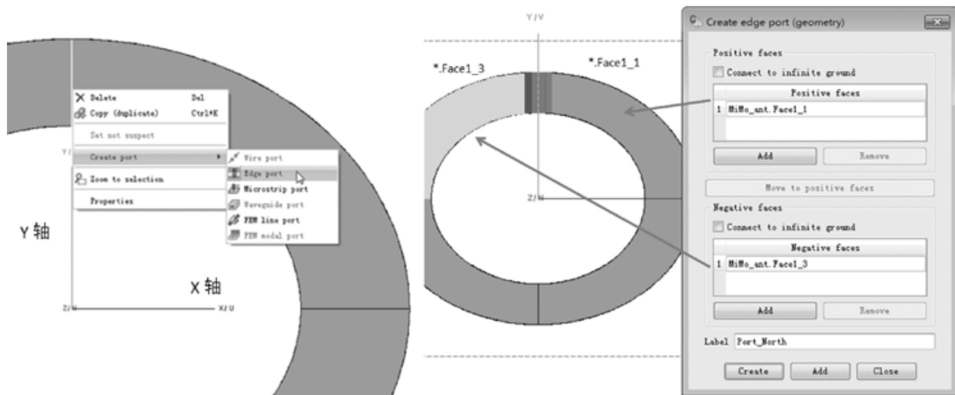


图 10-80　定义端口“Port_North”

（4）设置工作频率

在左侧的树形浏览器中，选择“Configuration”选项卡，在“Global”结点中，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，设置“Frequency(Hz)”为“freq”，单击“OK”按钮。

（5）设置求解参数（特征模）

在左侧的树形浏览器中，在“Configuration”选项卡中，在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Characteristic modes”选项，弹出“Request characteristic modes analysis”对话框，进行如下设置。

Number of modes to calculate：5。

单击“Create”按钮，如图 10-81 所示。

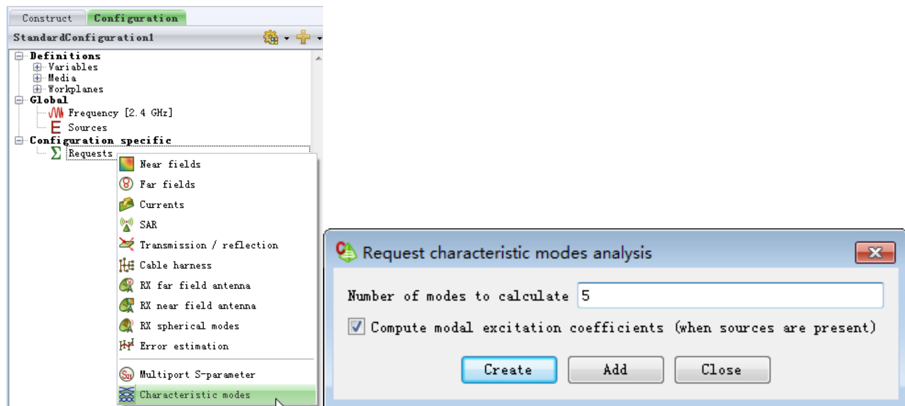


图 10-81　设置模式求解分析与要考虑的模式数

（6）设置远场

在“Configuration specific”结点中选择“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“Far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮。

Increment：(θ：1; φ：1)。

Label：ff_3D。

单击“Create”按钮，如图 10-82 所示。

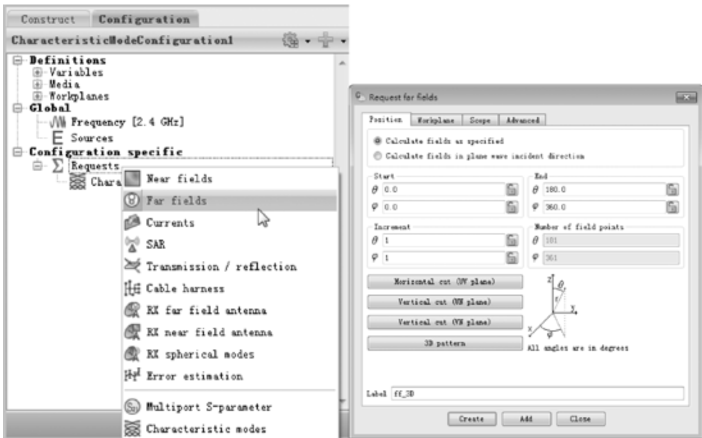


图 10-82　设置远场求解

（7）设置电流

在“Configuration specific”结点中选择“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“Currents”选项，弹出“Request currents”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 10-83 所示。

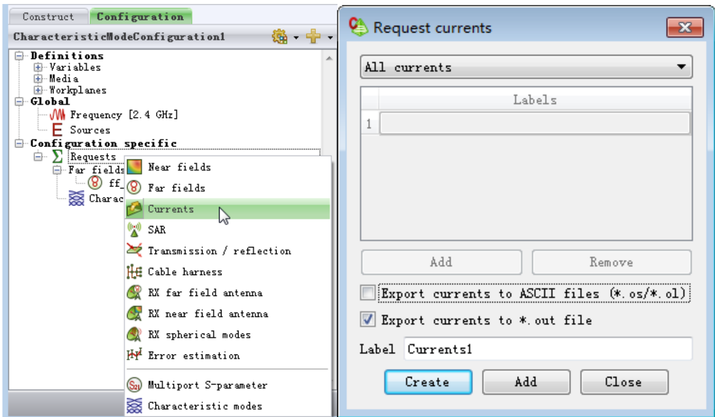


图 10-83　设置电流

设置求解参数——激励模式 1：在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”中，存在“StandardConfiguration1”和新添加的“CharacteristicModeConfiguration1”，选中“Standard-Configuration1”，将其更名为“ExciteMode_1”。

在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中，展开“Global”结点，选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，进行如下设置。

Port：Port_East。

Label：vEast。

单击“Add”按钮，继续设置。

Port：Port_West。

Phase(degrees)：180。

Label：vWest。

单击“Create”按钮，如图 10-84 所示。

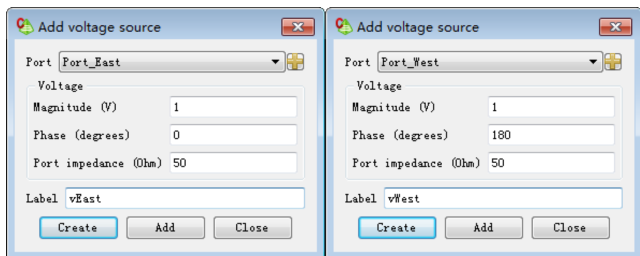


图 10-84　设置激励源

在“Global”结点中选中“Sources”结点中，单击鼠标右键，选择“Specify sources per configuration”选项，这时“Sources”结点会移到“Configuration specific”结点中（目的是让激励对应不同的求解）。

（8）设置远场求解

在“Configuration specific”结点中选择“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“far fields”选项，弹出“Request far fields”对话框，进行如下设置。

单击“3D pattern”按钮。

Increment：(θ: 1; φ: 1)。

Label：ff_3D。

单击“Create”按钮，如图 10-85 所示。

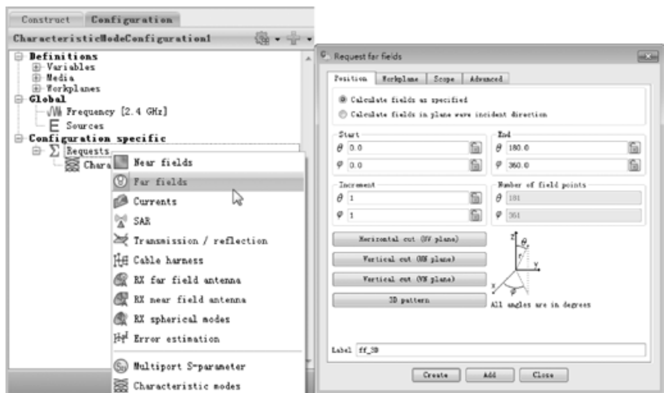


图 10-85　设置远场求解

（9）设置电流

在“Configuration specific”结点中选择“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“Currents”选项，弹出“Request currents”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮，如图 10-86 所示。

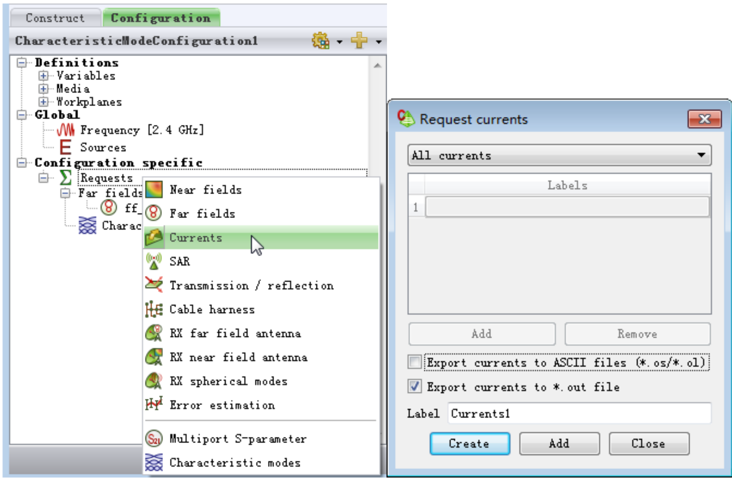


图 10-86 设置电流计算

（10）设置求解参数（激励模式 5）

在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”中，选中“ExciteMode_1”，单击鼠标右键，选择“Copy(Duplicate)”选项，把新生成的“ExciteMode_1_1”更名为“Excite Mode_5”。

（11）添加激励设置

在“Configuration specific”结点，展开“Sources”结点，双击“vWest”，弹出“Modify voltage source”对话框，进行如下设置。

Phase(degrees)：0。

单击“OK”按钮，如图 10-87 所示。

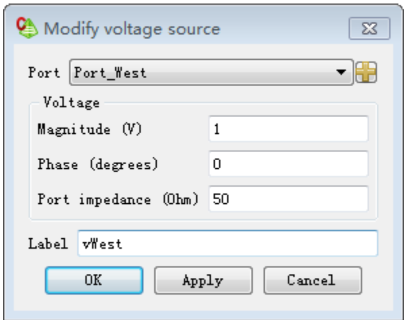


图 10-87 添加激励设置

选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，进行如下设置。

Port：Port_North。

Label：vNorth。

Phase(degrees)：180。

单击“Add”按钮，继续设置。

Port：Port_South。

Phase(degrees)：180。

Label：vSouth。

单击“Create”按钮，如图 10-88 所示。

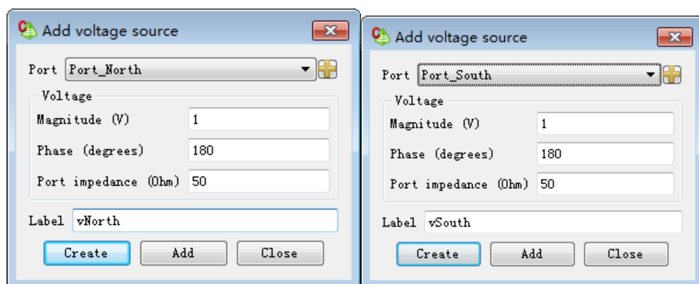


图 10-88　设置电压激励

（12）设置几何对称

进入“Solve/Run”菜单，单击“Symmetry”按钮，弹出“Symmetry definition”对话框，进行如下设置。

X=0 plane：Geometric symmetry。

Y=0 plane：Geometric symmetry。

单击“OK”按钮，如图 10-89 所示。

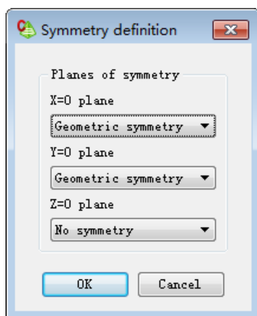


图 10-89　设置几何对称

（13）网格剖分

进入“Mesh”菜单，单击“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，进行如下设置。

Mesh size：Fine。

单击“Mesh”按钮，如图 10-90 所示。

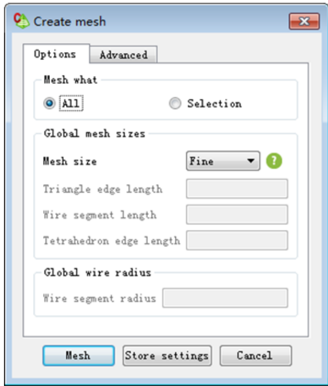


图 10-90 设置网格剖分

（14）提交计算

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交 FEKO 计算。

（15）结果显示

在 CADFEKO 中，进入“Solve/Run”菜单，单击“POSTFEKO”按钮，启动后处理模块 POSTFEKO。

3D 云图显示（电流）：在“Home”菜单中，单击“Current”按钮，选择在 CADFEKO 中设置的“Current1”，默认情况下显示的是 CMA 分析（即 CharacteristicMode Configuration1）得到的电流。在右侧的控制面板中，进行如下设置。

Mode index：1。

选中：Instantaneous magnitude。

勾选：dB，如图 10-91 所示。

进入“Result”菜单，单击“Show arrows”按钮，再单击“Arrow size”，选择“40%”。

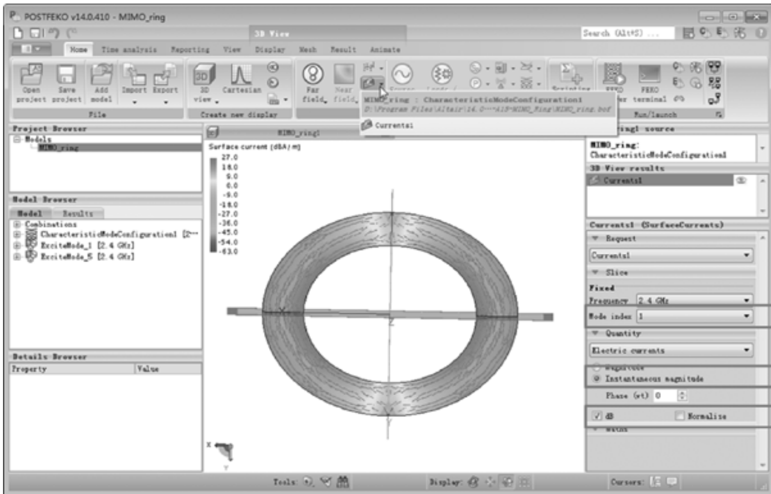


图 10-91 显示模式 1 的电流分布

在右侧的控制面板中设置“Mode index”为 5，如图 10-92 所示。

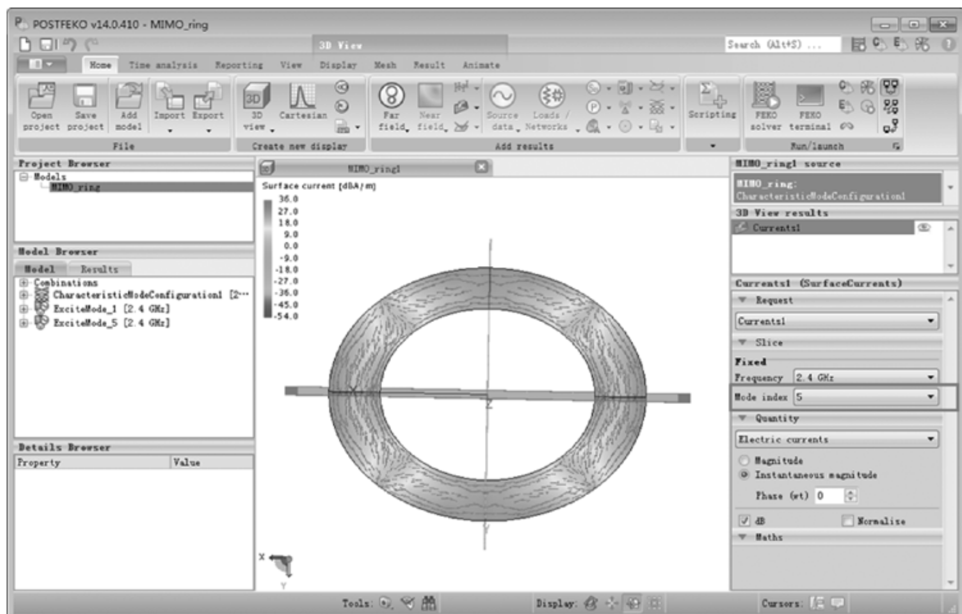


图 10-92　显示模式 5 的电流分布

在右侧的控制面板顶部区域“MIMO_ring1 source”中，点选“ExciteMode_1”，显示添加激励激发模式 1 时的电流云图分布，如图 10-93 所示。

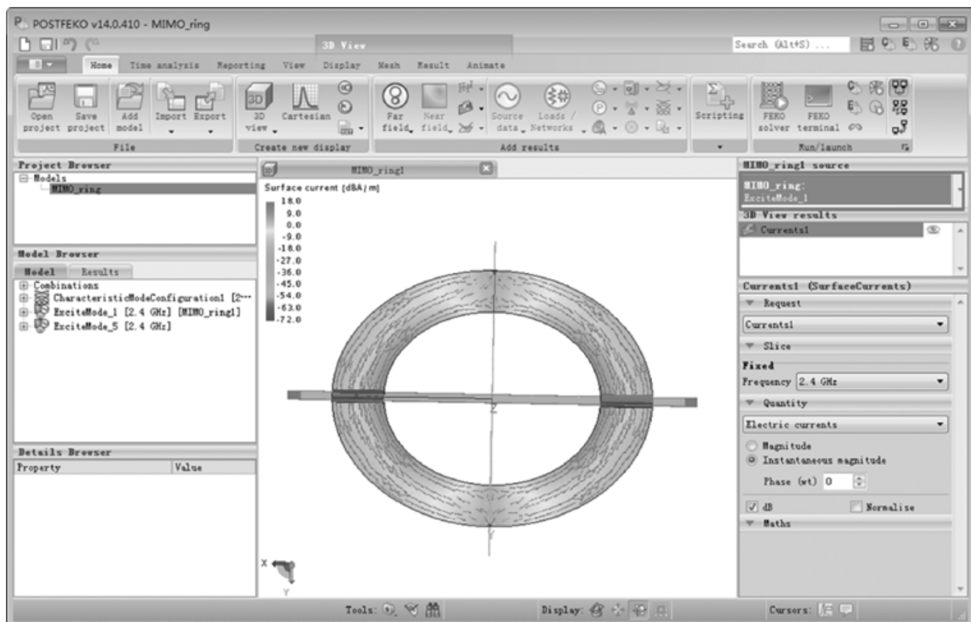


图 10-93　显示添加激励激发模式 1 的电流分布

在右侧的控制面板顶部区域“MIMO_ring1 source”中，点选“ExciteMode_5”，显示添加激励激发模式 5 时的电流云图分布，勾选“Normalise”和“dB”两个复选框，如图 10-94 所示。

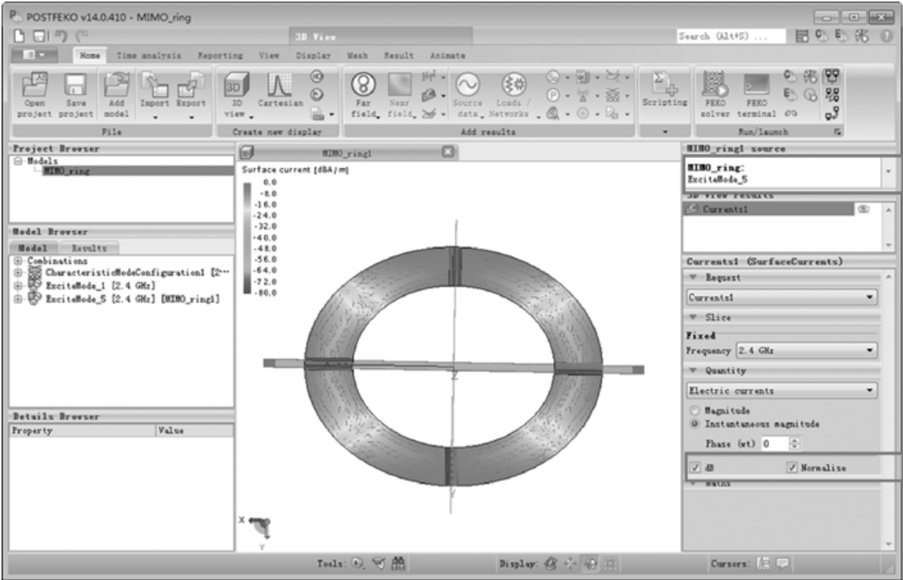


图 10-94　显示添加激励激发模式 5 的电流分布（归一化）

2D 远场显示：在“Home”菜单中，单击“Polar”按钮，显示极坐标显示“Polar graph1”，单击“Far field”按钮下的“CharacterisitcModeConfiguration1”中的 ff_3D，在右侧的控制面板中进行如下设置。

Independent axis(Angular)：Theta(wrapped)。

Mode index：1，如图 10-95 所示。

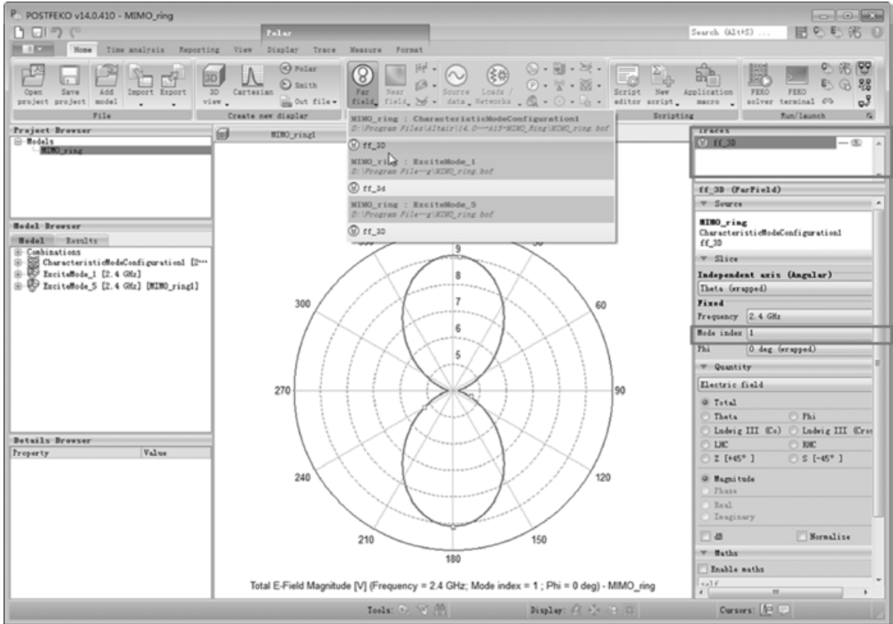


图 10-95　显示模式 1 的远场电场（Phi=0deg）

在右侧的控制面板顶部的“Traces”区域内，选中“ff_3D”，单击鼠标右键，选择“Rename”选项，更名为“ff_3D_Model1”；再单击鼠标右键，选择“Duplicate trace”选项，把新生成的 Trace 更名为“ff_3D_Mode5”，把“Mode index”设置为 5，显示如图 10-96 所示。

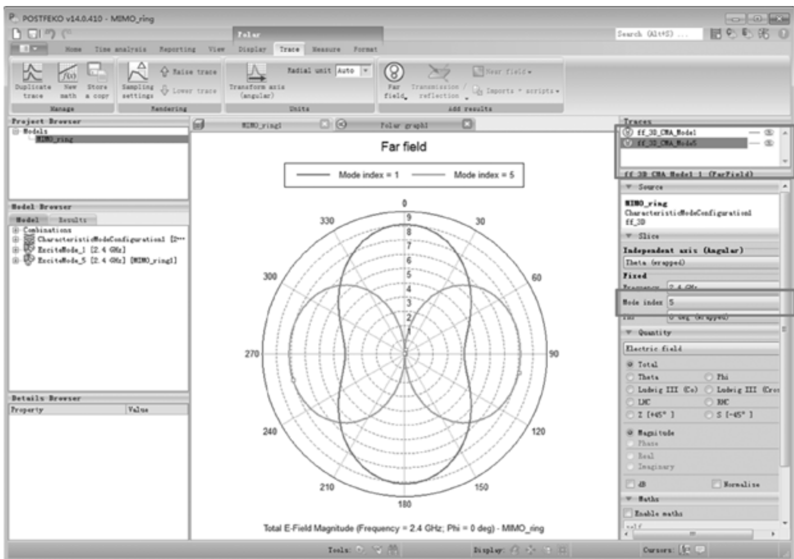


图 10-96　CMA 分析得到的模式 1 和模式 5 在 Phi=0deg 时的平面的远场曲线

在控制面板顶部的“Traces”区域内，同时选中“ff_3D_CMA_Mode1”和“ff_3D_CMA_Mode5”，勾选“Normalise”复选框。

在“Traces”区域内，选中“ff_3D_CMA_Mode1”，单击鼠标右键，选择“Duplicate trace”选项，把新生成的 Trace 更名为“ff_3D_CMA_Mode1_ExciteMode1”，同时在“Source”区域内点选“Excite_Mode_1”，如图 10-97 所示。

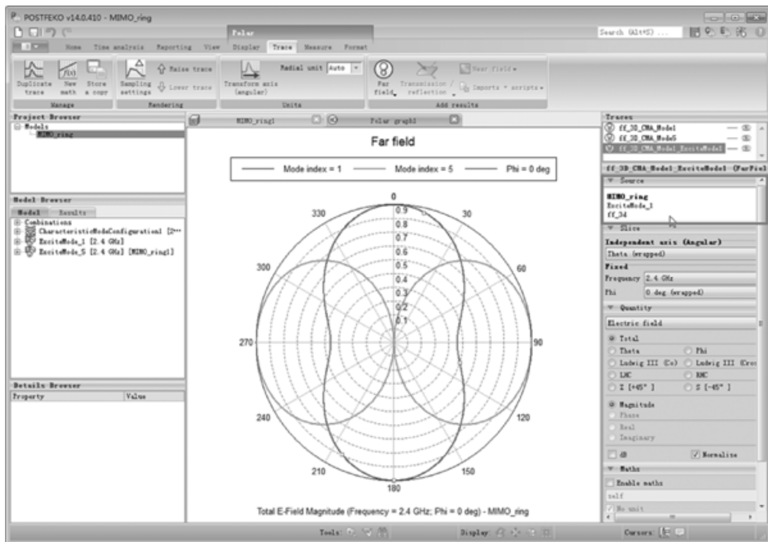


图 10-97　添加激励激发模式 1 的结果

在“Traces”区域内，选中“ff_3D_CMA_Mode1_ExciteMode1”，单击鼠标右键，选择“Duplicate trace”选项，把新生成的 Trace 更名为“ff_3D_CMA_Mode1_ExciteMode5”，同时在“Source”区域内点选“Excite_Mode_5”，结果如图 10−98 所示。

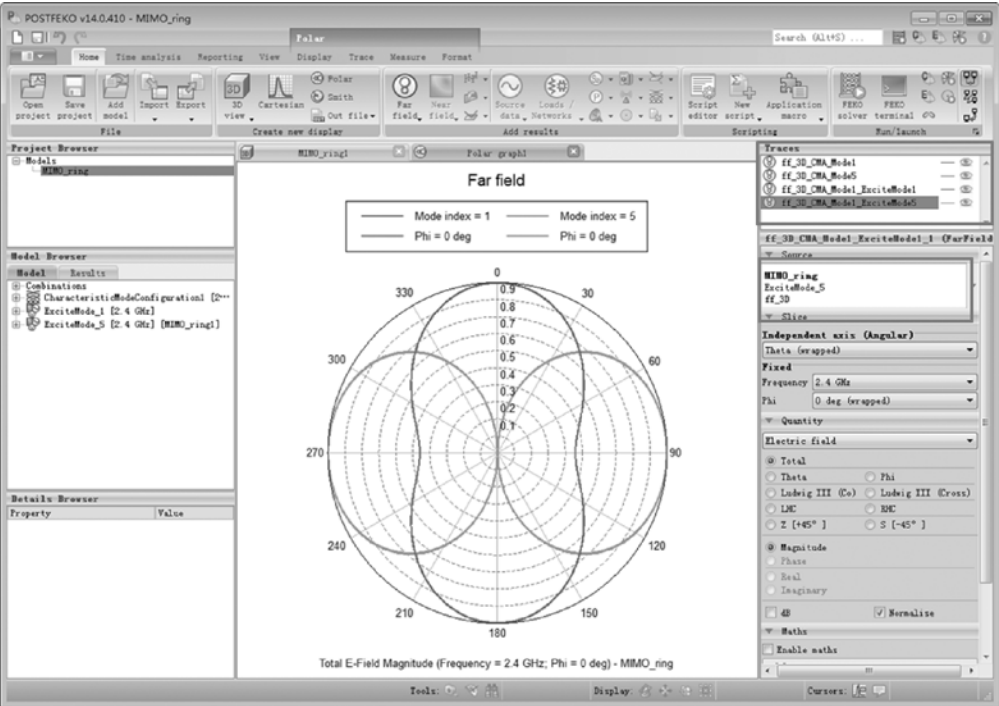


图 10−98　添加激励激发模式 5 的结果

在“Home”菜单中，单击“Save Project”按钮，保存结果文件。

从以上分析结果可知，采用特征模分析与添加激励组合激发模式 1 和模式 5 两种方式得到的电流分布和远场分布规律是一致的。通过特征模分析，可以清楚地了解不同模式的电性能，通过各种模式电流的分布特征，确定如何激发出相应的模式。

10.4　机箱屏蔽效能

设备工作在特定的电磁环境中，为使机箱内设备正常工作，降低对外界电磁环境的影响，需要对机箱的电磁屏蔽性能进行评估。FEKO 软件能够在不同方向、不同极化形式的电磁波照射下，分析机箱的电磁屏蔽性能，并且可以考虑不同的箱体开孔以及屏蔽措施对系统电磁屏蔽性能的改进程度。

10.4.1　问题描述

本案例将采用的计算方法是矩量法，机箱结构尺寸与加载说明如图 10−99 所示。

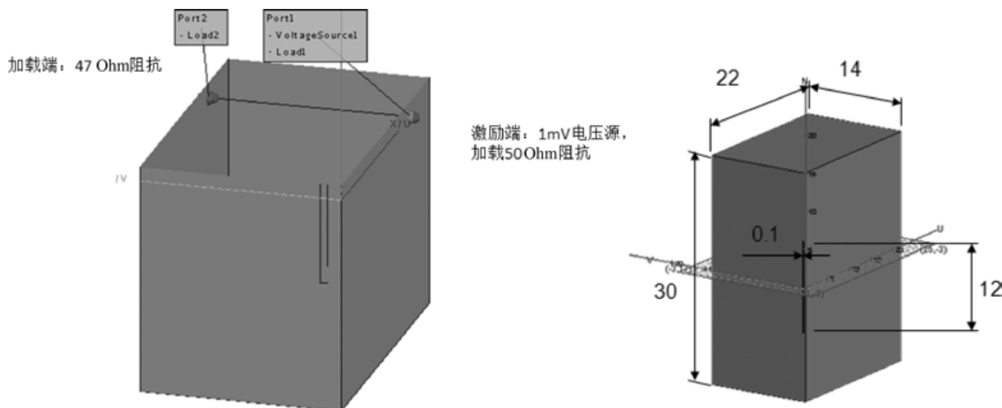


图 10–99　机箱结构尺寸与加载说明

10.4.2　FEKO中的仿真实现

启动 CADFEKO，新建一个工程“box_with_slot_emission.cfx”，在以下的各个操作过程中，可以即时保存做过的任何修改。完整的工程文件参考“…/chapter10/app4/box_with_slot_emission.cfx”，起始操作工程位于“…/chapter10/app4/started/”，其中包含了变量的定义。

（1）定义长度单位

单击“Home”菜单中的“Model unit”按钮，在“Model unit”对话框中，选中“Centimetres(cm)”单选按钮，如图 10–100 所示。

（2）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

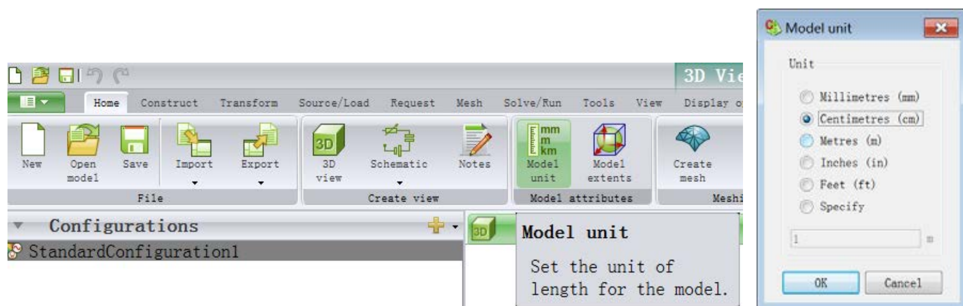


图 10–100　设置长度单位为 cm

工作频率：freq=1.53e9。

长度缩放系数：sf =0.01。

工作波长：lam = c0/freq/sf。

缝隙的长度：s_L=12。

缝隙的宽度：s_h=0.1。

缝隙离开机箱的距离：s_dh=0.2。

网格剖分：tL0=lam/10。

缝隙剖分：tL1=min(tL0,3*s_h)。

线段半径：sR0=0.08，如图 10-101 所示。

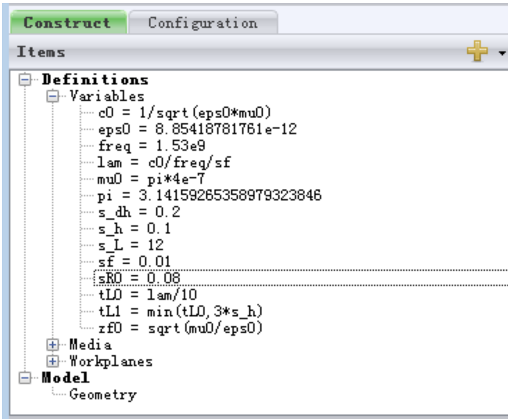


图 10-101　定义变量

（3）机箱模型建立

单击“Construct”菜单中的“Cuboid”按钮，弹出“Create cuboid”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”对话框中：

Base corner(C)：(U：0.0 ; V：0.0 ; N：−15)。

Width(W)：22。

Depth(D)：14。

Height(H)：30。

Label：Box。

单击“Create”按钮，如图 10-102 所示。

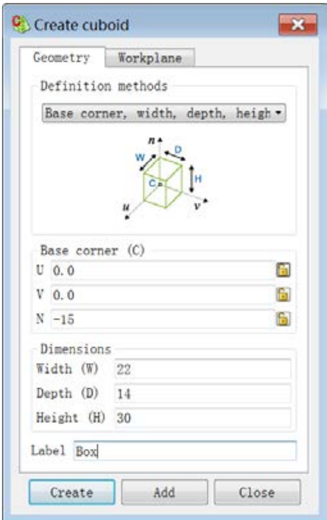


图 10-102　定义机箱（不考虑厚度）

选中新生成的模型“Box”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选中“Region1”并单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium：Free space。

单击“OK”按钮，如图 10-103 所示。

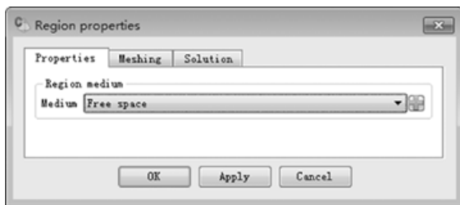


图 10-103　修改 Region 区域的材料为“Free space”

（4）缝隙模型建立

在“Construct”菜单中，单击“Rectangle”按钮，弹出“Create Rectangle”对话框，进行如下设置。

在“Workplane”对话框中：

Orgin：(X：0.0; Y：s_dh; Z：−s_L/2)。

U vector：(X：0; Y：0.0; Z：1)。

V vector：(X：0.0; Y：1.0; Z：0.0)。

进入“Geometry”选项卡：

Base corner(C)：(U：0.0; V：0.0; N：0.0)。

Width (W)：s_L。

Depth(D)：s_h。

Label：slot。

单击“Create”按钮，如图 10-104 所示。

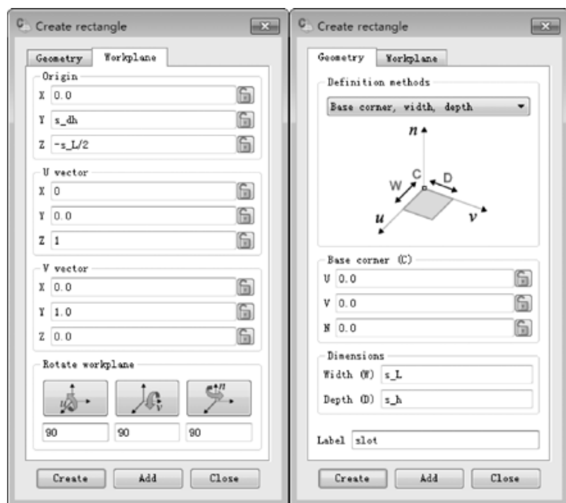


图 10-104　定义缝隙“slot”

在左侧的树形浏览器中，展开“Model”→“Geometry”结点，选择新建立的“slot”，在其“Details”中，展开“Edges”结点，选择所有的棱边，单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Edge properties”对话框，进行如下设置。

在“Meshing”选项卡中：

勾选：Local mesh size。

Mesh size：tL1。

单击“OK”按钮，如图 10-105 所示。

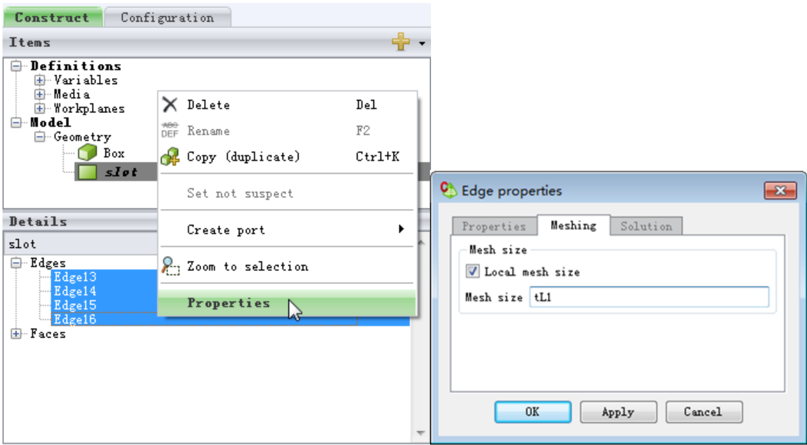


图 10-105　设置缝隙处棱边剖分规则

在“Construct”菜单中，单击“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，进行如下设置。

在“Workplane”选项卡中：

修正 Origin：X=17。

进入“Geometry”选项卡：

Start point：(U：0.0; V：0.0; N：0.0)。

End point：(U：0.0; V：14; N：0.0)。

Label：probe。

单击“Create”按钮，如图 10-106 所示。

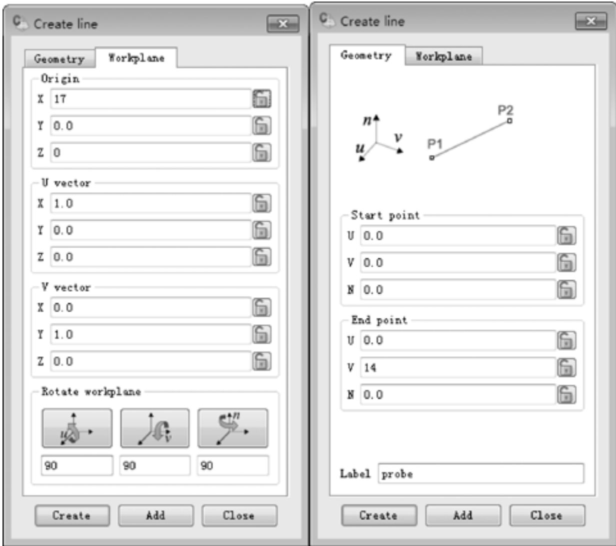


图 10-106　定义辐射导线“probe”

在左侧的树形浏览器中，展开“Geometry”结点，选择新建立的“slot”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Subtract from”选项，弹出“Subtract from”对话框，不要关闭该对话框，直接在左侧的树形浏览器中单击新建的模型“Box”，把新生成的模型更名为“Box_slot”，如图 10-107 所示。

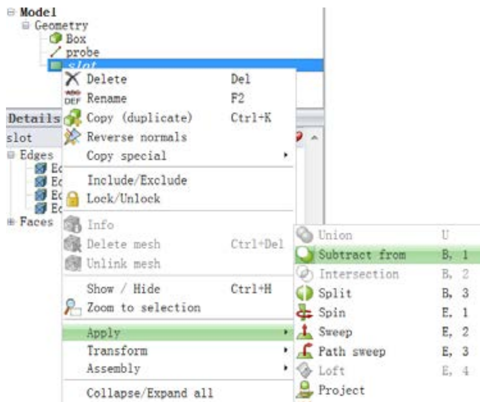


图 10-107　选择缝隙模型“slot”并从机箱“Box”上减去

选中新生成的模型“Box_slot”，单击鼠标右键，选择“Apply”→“Imprint points”选项，弹出“Create imprint points”对话框（这样操作后，就不需要和“probe”进行布尔操作了，能保证“probe”和机箱共结点），进行如下设置。

Point 1：(U：17; V：14; N：0)。

单击“Add”按钮，继续设置。

Point 2：(U：17; V：0 ; N：0)。

单击“Create”按钮，如图 10-108 所示。

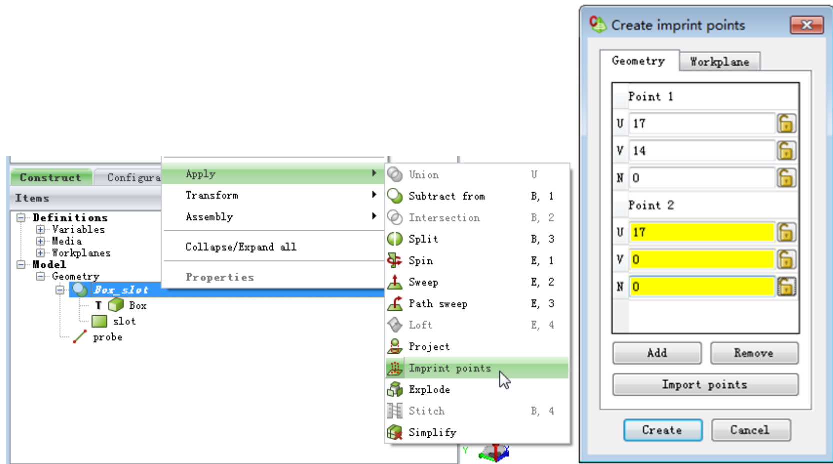


图 10-108　定义机箱体上的点

（5）创建端口

在左侧的树形浏览器中，选中新建的模型“probe”，在其“Details”中，展开“Wires”

结点，选择“Wire17”，单击鼠标右键，选择“Create port”选项，弹出“Create wire port (geometry)”对话框，进行如下设置。

Location on wire：Start。

Label：port1。

单击“Add”按钮，继续设置。

Location on wire：End。

Label：Port2。

单击“Create”按钮，如图 10-109 所示。

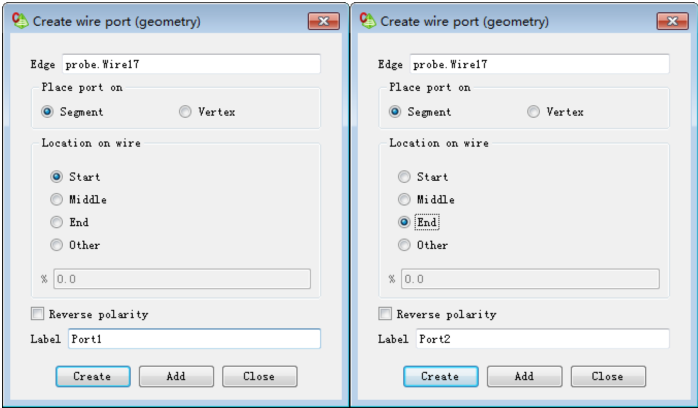


图 10-109　定义线端口

（6）设置磁对称

进入“Solve/Run”菜单，单击最左侧的“Symmetry”按钮，弹出“Symmetry definition”对话框，进行如下设置。

Z=0 plane：Magnetic symmetry。

单击“OK”按钮，如图 10-110 所示。

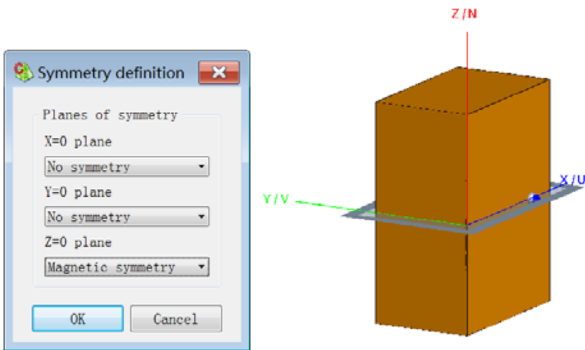


图 10-110　定义 Z=0 平面为磁对称

（7）电参数设置

在左侧的树形浏览器中，由“Construct”切换到“Configuration”，进行如下设置。

工作频率设置：展开“Global”结点，选中“Frequency”结点，单击鼠标右键，选择“Specify frequency per configuration”选项，“Frequency”结点会自动跳到“Configuration specific”结点中，双击“Frequency”结点，在弹出的“Solution frequency”对话框中设置如下。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮，如图 10-111 所示。

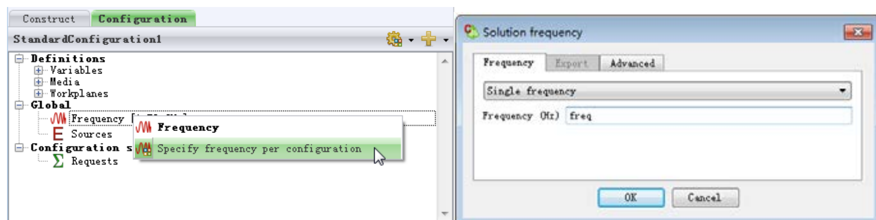


图 10-111　设置工作频率

激励设置：在“Global”结点中，选中“Sources”结点，单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，进行如下设置。

Port：Port1。

Magnitude(V)：1e-3。

Label：VoltageSource1。

单击“Create”按钮，如图 10-112 所示。

阻抗加载设置：在“Global”结点中，选中“Global”结点，单击鼠标右键，选择“Add load”选项，如图 10-113 所示，弹出“Create load”对话框，进行如下设置。

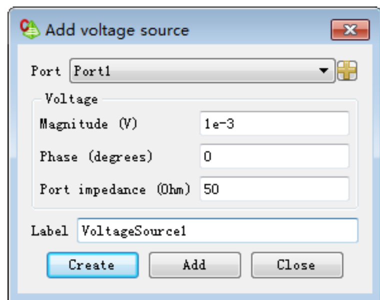


图 10-112　定义端口激励

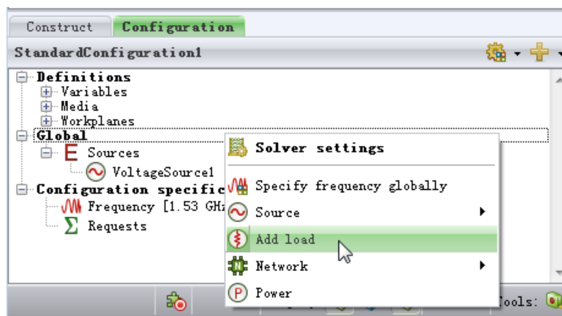


图 10-113　添加端口负载

Port：Port1。

Real part：50。

Label：Load1。

单击“Add”按钮，继续设置。

Port：Port2。

Real part：47。

Label：Load2。

单击“Create”按钮，如图 10-114 所示。

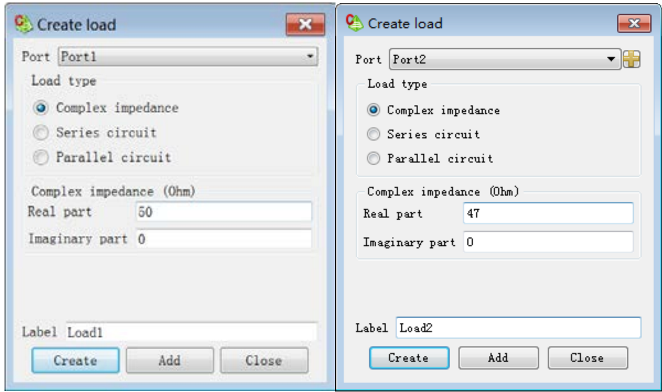


图 10-114 设定端口加载

求解设置：在“Configuration specific”结点中，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Near fields”选项，弹出“Request near fields”对话框，进行如下设置。

Definition methods：Spherical。

选择：Specify increments。

Start：(r：300；θ：90；φ：0)。

End：(r：300；θ：180；φ：360)。

Increment：(r：0；θ：2；φ：4)。

Label：half_sphere_3m。

单击“Create”按钮，如图 10-115 所示。

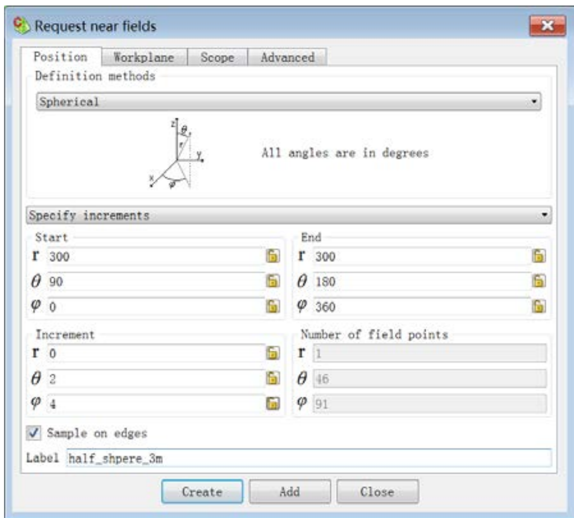


图 10-115 近场求解设置（half_shpere_3m）

在左侧的树形浏览器上方的“Configurations”中，单击右侧的“ ”按钮，选择

“Standard configuration”，如图 10-116 所示，新生成的求解设置是“Standard Configuration2”，选中它并将其更名为“SC_AFS”。再选中“StandardConfiguration1”，更名为“SC_1p53GHz”。

在“Configurations”中，选中新定义的求解设置“SC_AFS”，在左侧的树形浏览器中，切换到“Configuration”选项卡，展开“Configuration specific”结点，双击“Frequency”结点，弹出“Solution frequency”对话框，进行如下设置。

选择：Continuous (interpolated) range。

Start frequency (Hz)：0.7e9。

End frequency (Hz)：1.6e9。

单击“OK”按钮，如图 10-117 所示。

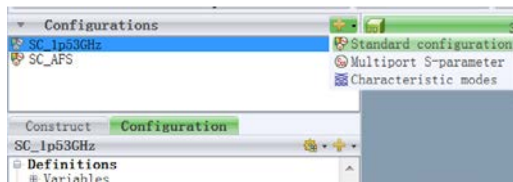


图 10-116 设置新的求解设置

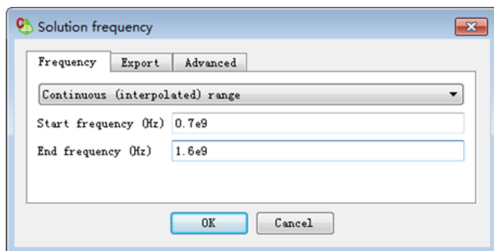


图 10-117 设定扫频方式和范围

选中“Requests”结点，单击鼠标右键，选择“Near fields”选项，弹出“Request near fields”对话框，进行如下设置。

Start：(U：300; V：0.0; N：0.0)。

End：(U：300; V：0.0; N：0.0)。

Label：NF_3m。

单击“Create”按钮，如图 10-118 所示。

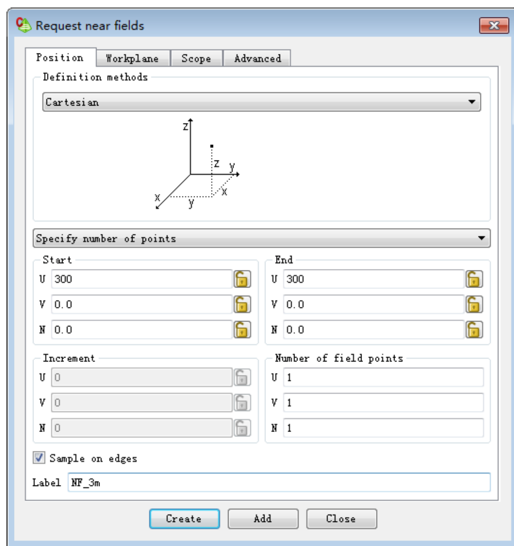


图 10-118 设定机箱外场点坐标

（8）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

网格剖分方法“Mesh size”：Standard。

线段半径“Wire segment radius”：sR0。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 10-119 所示。

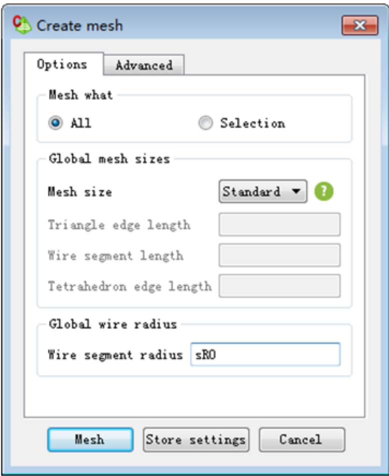


图 10-119　定义网格划分

（9）提交计算

计算方法采用默认的矩量法（MoM）。

进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。可以选择并行模式（有指导老师演示如何设置并行或查看相应的手册说明，如“FEKO 软件安装中文手册”）。

（10）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中，单击“Near field”按钮下的“half_sphere_3m”，在右侧的控制面板中勾选“dB”复选框。

进入“Result”菜单，选择“Show contours”（显示等值线）。

在 3D 视图中，将模型适中显示，按住〈Ctrl+Shift〉快捷键，在 3m 半球区域内任意一点位置单击鼠标左键，会自动拾取到该点的场值。这时，得到的 3D 显示效果如图 10-120 所示。

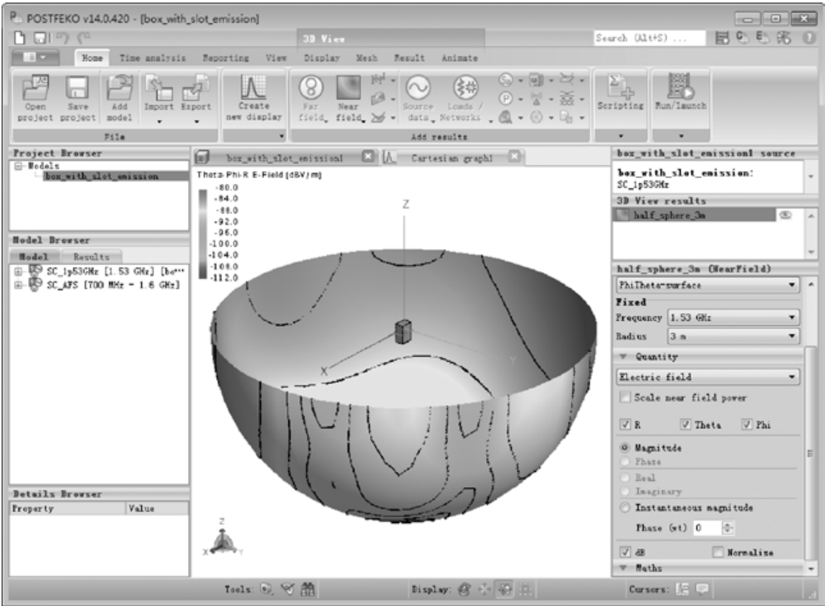


图 10-120　3D 缝隙外部 3m 半空间的场强云图分布

显示 2D 结果：切换到“Home”菜单，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，单击“Near field”→“NF_3m”，会在直角坐标系中直接显示缝隙正前方 3m 处一点的电场值曲线。在右侧控制面板的 Traces 区域内将自动生成 NF_3m，选中“NF_3m”，在控制面板中勾选“dB”复选框。2D 显示结果如图 10-121 所示。

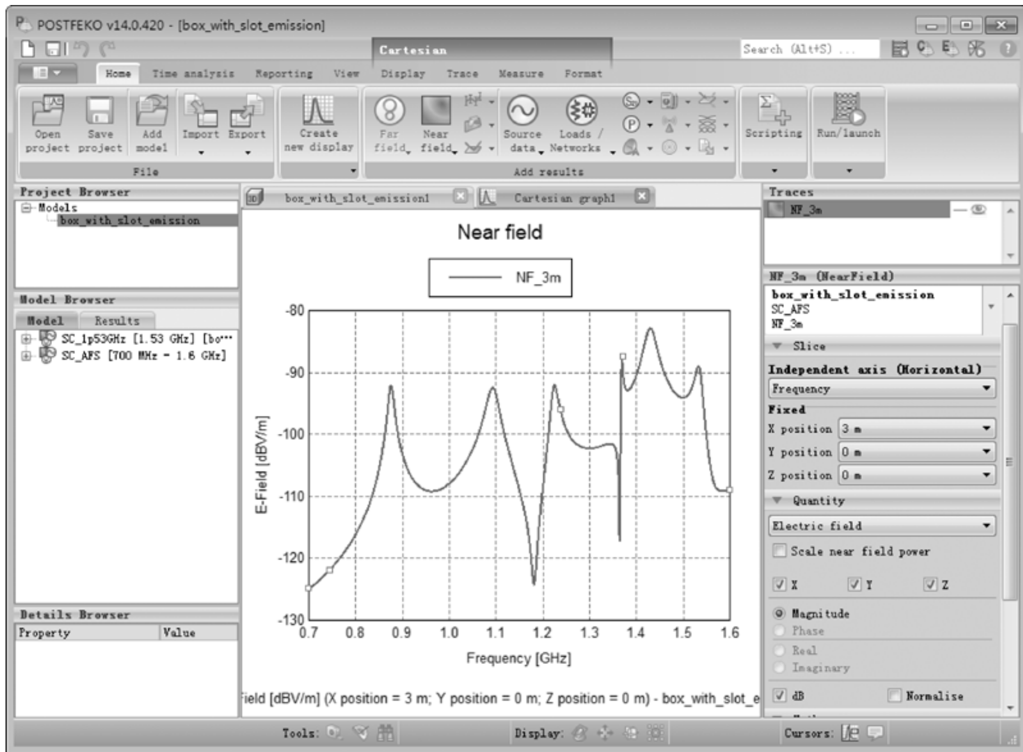


图 10-121　缝隙正前方 3m 处坐标（3,0,0）的辐射电场强度频谱分布

10.5　生物电磁

SAR（Specific Absorption Rate）即为电磁波吸收比值或比吸收率，是手机或无线电子产品辐射的电磁波能量吸收比值，其定义为：在外部电磁场的作用下，在人体内将产生感应电磁场。

由于人体各种器官均为有耗介质，因此体内电磁场将会产生电流，导致吸收和耗散电磁能量。生物剂量学中常用 SAR 来表征这一物理过程。SAR 的物理意义为单位质量的人体组织所吸收或消耗的电磁功率，单位为 W/kg。

本案例将分析介质球生物电磁性能，提取 SAR，介质球半径为 0.033m，介电常数为 56，电导率为 1，频率为 900MHz。

启动 CADFEKO，新建一个工程“SAR_SEP.cfx”，这里采用面等效法（SEP）。天线辐射介质球体 SAR 模型如图 10-122 所示。

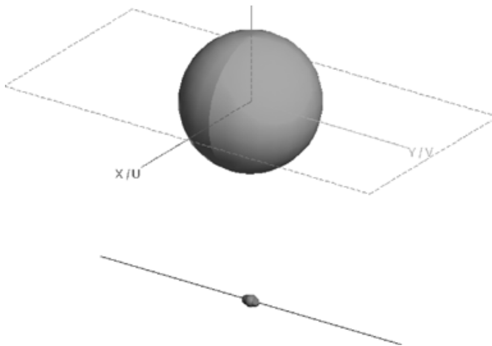


图 10-122　天线辐射介质球体 SAR 模型

（1）定义变量

在 CADFEKO 中左侧的树形浏览器中双击“Variables”结点，依次定义如下变量。

工作频率：freq=0.9e9。

介电常数：epsr=56。

电导率：sigma=1。

工作波长：lam = c0/freq。

网格尺寸：ms = lam/9/sqrt(epsr)，如图 10-123 所示。

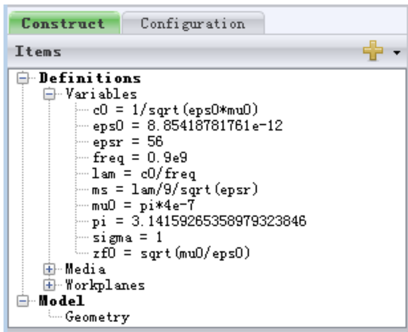


图 10-123　定义变量

（2）机箱模型建立

单击“Construct”菜单中的“Sphere”按钮，弹出“Create sphere”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Center：(U：0.0 ; V：0.0 ; N：0.0)。

Radiu：0.033。

Label：Sphere1。

单击“Create”按钮，如图 10-124 所示。

单击“Construct”菜单中的“Line”按钮，弹出“Create line”对话框，进行如下设置。

在“Geometry”选项卡中：

Start point：(U：0.0; V：−lam/4; N：−0.1)。

End point：(U：0; V：lam/4; N：−0.1)。

Label：dipole。

单击“Create”按钮，如图 10-125 所示。

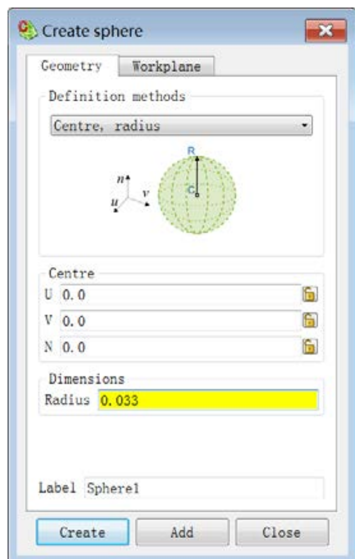


图 10-124　定义球体模型

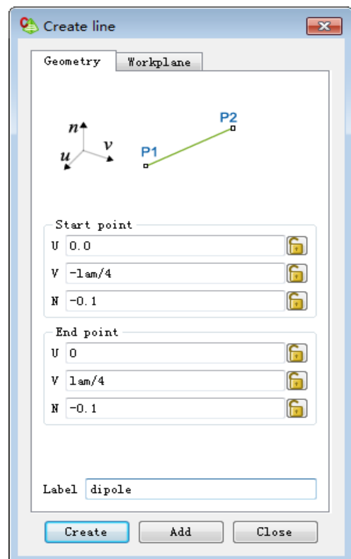


图 10-125　定义半波振子

（3）定义介质材料

在左侧树形浏览器的“Construct”选项卡中，选中“Definitions”结点下的“Media”结点，单击鼠标右键，选择“Dielectric medium”选项，如图 10-126 所示，弹出“Create dielectric medium”对话框，进行如下设置。

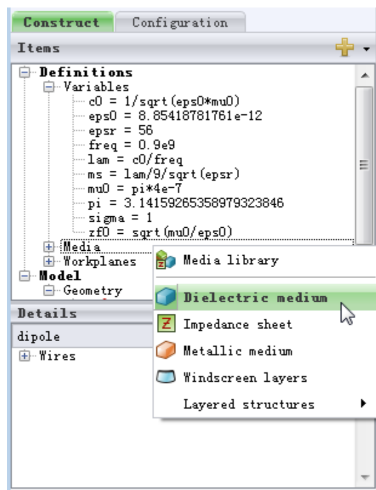


图 10-126　创建 muscle 材料

Relative permittivity：epsr。

Conductivity：sigma。

Mass density：1000.0。

Label：muscle，如图 10-127 所示。

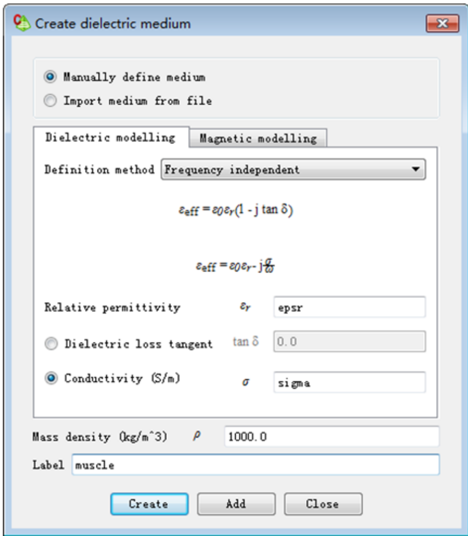


图 10-127　定义 muscle 材料

左侧的树形浏览器中展开“Model”→“Geometry”结点，选中球模型“Sphere1”，在左下角的“Details”中，展开“Regions”结点，选中“Region1”并单击鼠标右键，选择“Properties”选项，弹出“Region properties”对话框，进行如下设置。

Medium：muscle。

单击“OK”按钮，如图 10-128 所示。

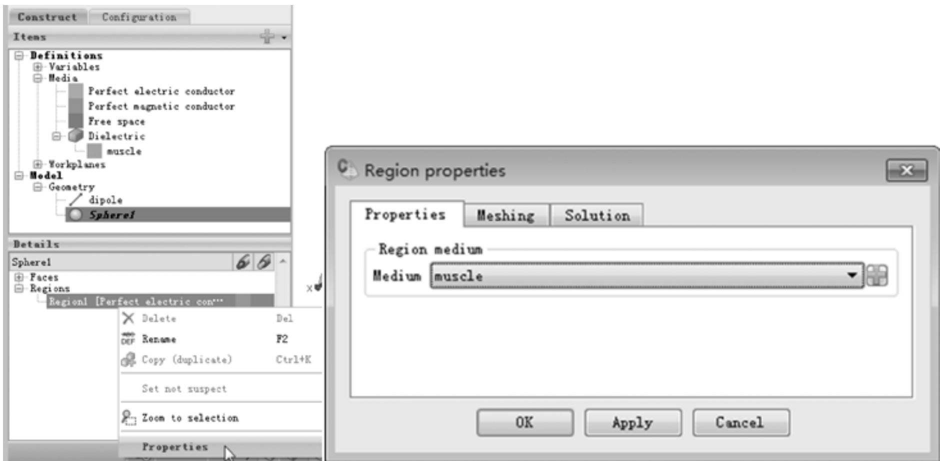


图 10-128　修改 Region 区域的材料为“muscle”

（4）创建端口和激励

在左侧的树形浏览器中，选中新建的模型“dipole”，在其“Details”中，展开“Wires”结点，选中“Wire1”并单击鼠标右键，选择“Create port”→“Wire port”选项，弹出

“Create wire port(geometry)”对话框，进行如下设置。

Location on wire：Middle。

Label：Port1。

单击“Create”按钮，如图 10-129 所示。

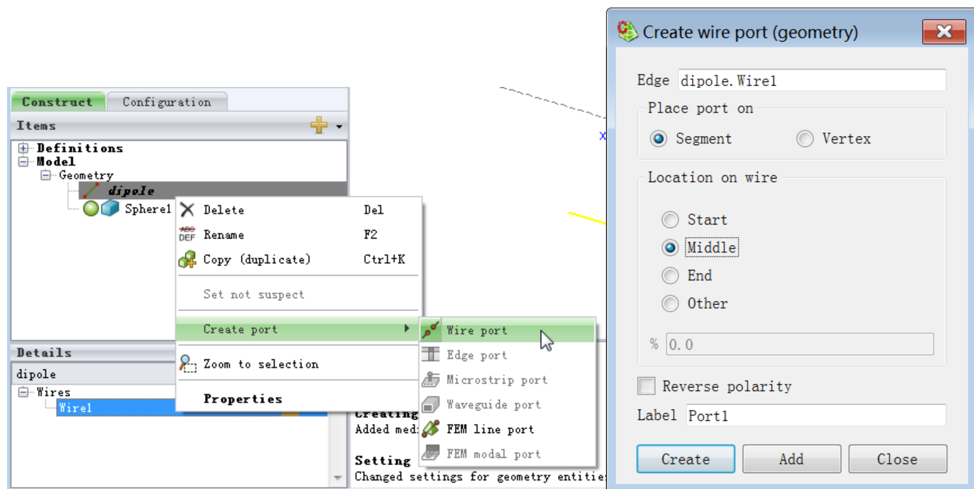


图 10-129　定义线端口

激励加载：在树形浏览器的“Configuration”选项卡中，展开“Global”结点，选中“Sources”并单击鼠标右键，选择“Voltage source”选项，弹出“Add voltage source”对话框，采用默认设置，单击“Create”按钮完成设置，如图 10-130 所示。

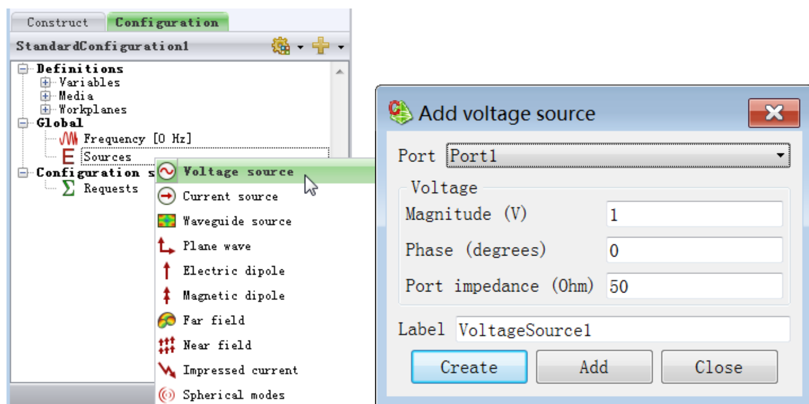


图 10-130　设置电压源为 1V，端口参考阻抗为 50 Ohm

功率加载：在左侧的树形浏览器的“Configuration”选项卡中，选中“Global”结点，单击鼠标右键，选择“Power”选项，弹出“Power settings”对话框，进行如下设置。

选中：Total source power (no mismatch)。

Source power (Watt)：1。

单击“OK”按钮，如图 10-131 所示。

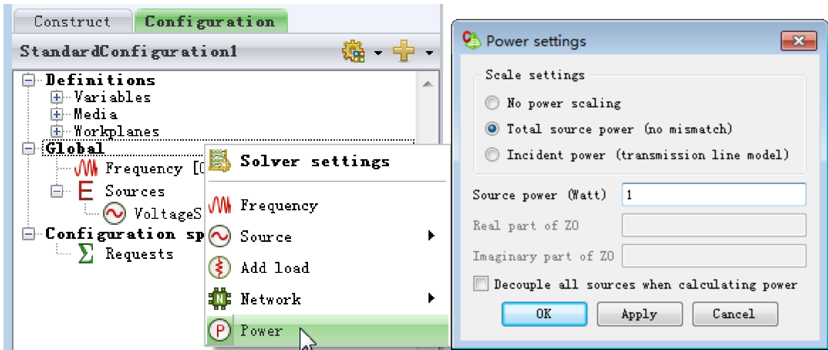


图 10-131　设定输入功率，考虑激励源端口的反射

（5）电参数设置

工作频率设置：展开“Global”结点，选中“Frequency”结点，单击鼠标右键，选择“Specify frequency per configuration”选项，“Frequency”结点会自动跳到“Configuration specific”结点中，双击“Frequency”结点，在弹出的“Solution frequency”对话框中设置如下。

选择：Single frequency。

Frequency (Hz)：freq。

单击“OK”按钮，如图 10-132 所示。

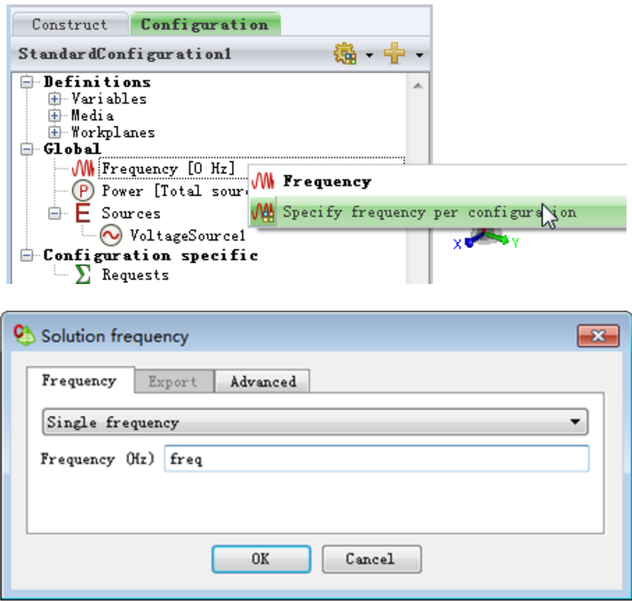


图 10-132　设置工作频率

求解设置：展开“Configuration specific”结点，选中“Requests”并单击鼠标右键，选择“Near fields”选项，弹出“Request near fields”对话框，进行如下设置。

Definition methods：Cartesian。

选择：Specify increments。

Start：(U：0.0 ; V：0.0; N：-0.08)。

End：(U：0.0; V：0.0; N：0.08)。

Increment：(U：0 ; V：0; N：ms/2)。

Label：NearField1。

单击“Create”按钮，如图 10-133 所示。

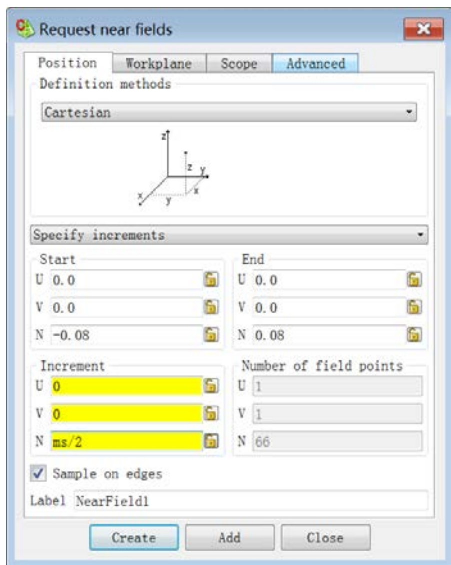


图 10-133　近场求解设置（NearField1）

添加比吸收率（SAR）：进入“Request”菜单，在“Solution requests”中单击“SAR”按钮，弹出“Request SAR”对话框，设置 10g 比吸收率，具体设置如下。

Select calculation：Spatial-peak SAR of a 10g cube。

Specify the search region：Entire model。

Label：SAR_10g，如图 10-134 所示。

单击“Add”按钮，继续设置。

Select calculation：Volume-average SAR。

Specify the search region：Entire model。

Label：SAR_volume。

单击“Create”按钮，如图 10-135 所示。

（6）对称设置

设置磁对称设置：进入“Solve/Run”菜单，单击最左侧的“Symmetry”按钮，弹出“Symmetry definition”对话框，进行如下设置。

X=0 plane：Magnetic symmetry。

Y=0 plane：Electric symmetry。

单击“OK”按钮，如图 10-136 所示。

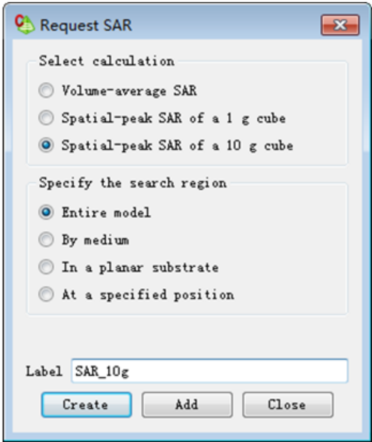


图 10-134　添加 10g 组织比吸收率

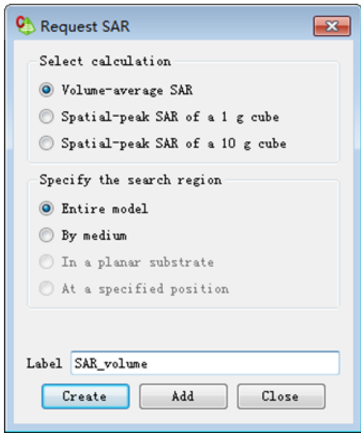


图 10-135　定义平均吸收率

（7）网格划分

单击“Mesh”菜单中的“Create mesh”按钮，弹出“Create mesh”对话框，设置如下。

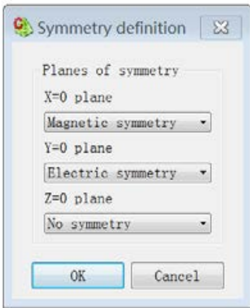
网格剖分方法“Mesh size”：Custom。

Triangle edge length：ms。

Wire segment length：lam/20。

Wire segment radius：0.001。

单击“Mesh”按钮生成网格，如图 10-137 所示。



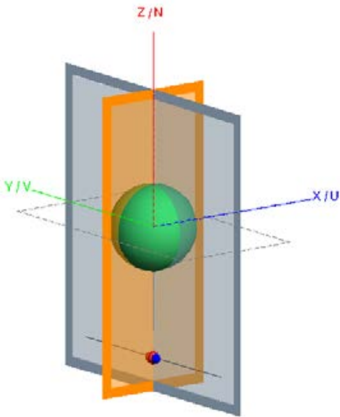


图 10-136　定义 Z=0 平面为磁对称

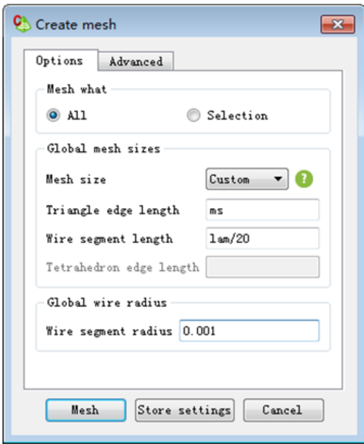


图 10-137　定义网格划分

（8）提交计算

计算方法采用默认的矩量法（MoM）中的面等效方法。进入“Solve/Run”菜单，单击“FEKO Solver”按钮，提交计算。

（9）后处理显示结果

计算完成后，单击“Solve/Run”菜单中的“POSTFEKO”按钮或按〈Alt+3〉快捷键，启动后处理模块 POSTFEKO 显示结果。

显示 3D 结果：在“Home”菜单中，单击“SAR”按钮下的“SAR_10g”，选择显示参数，如图 10-138 所示。

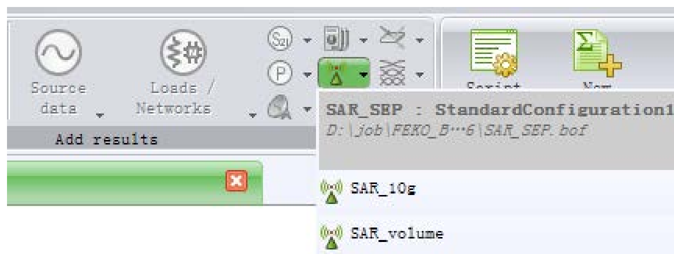


图 10-138　选择显示参数

在“Mesh”菜单中单击“Dielectric”下拉按钮，取消勾选“Faces”复选框，勾选“Edges”复选框，设置网格显示，如图 10-139 所示。3D 比吸收率显示如图 10-140 所示。

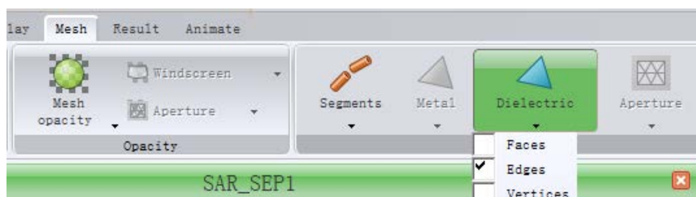


图 10-139　设置网格显示

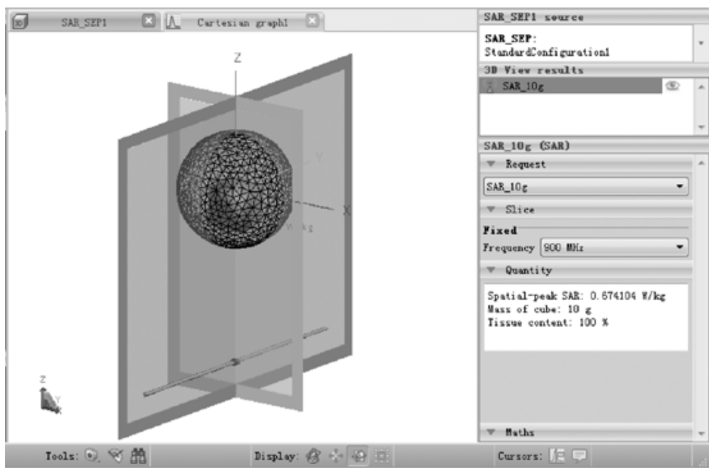


图 10-140　3D 比吸收率显示

显示 2D 结果：切换到“Home”菜单，单击“Cartesian”，进入直角坐标系“Cartesian graph1”，单击“Near field”→“Nearfield1”，会在直角坐标系中直接显示介质球沿 Z 方向上的电场值曲线，如图 10-141 所示。在右侧控制面板的“Traces”区域内将自动生成 NearField1，“Quantity”参数默认为“Electric field”。

在右侧的控制面板中，将“Quantity”修改为“Magnetic field”，磁场强度沿 Z 轴的场强分布如图 10-142 所示。

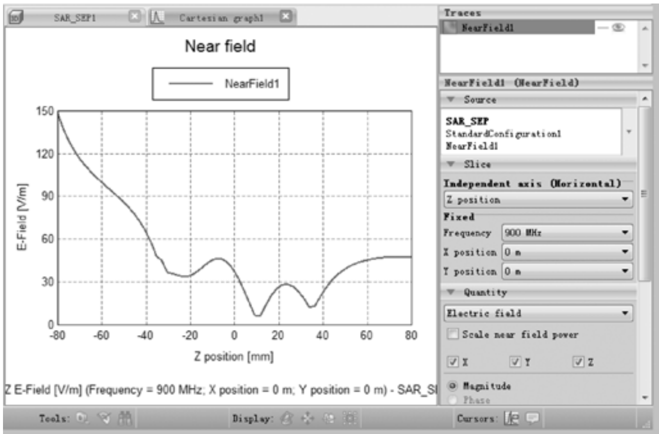


图 10-141　电场强度沿 Z 轴的场强分布

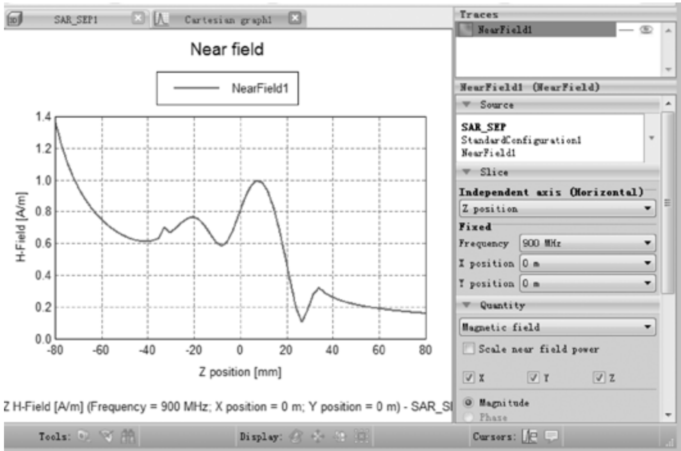


图 10-142　磁场强度沿 Z 轴的场强分布

再将“Quantity”修改为“SAR”，SAR 沿 Z 轴的场强分布如图 10-143 所示。

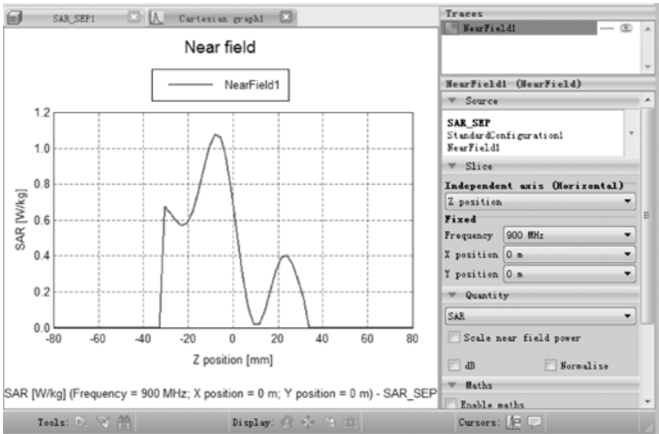
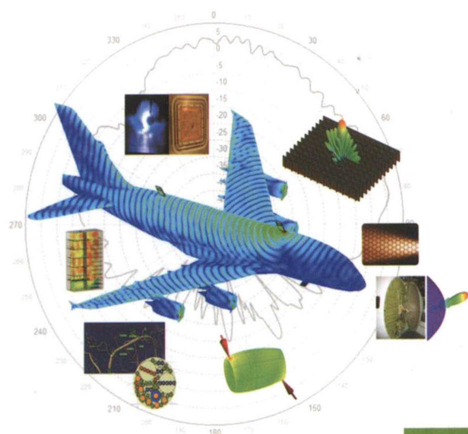


图 10-143　SAR 沿 Z 轴的场强分布

在“Home”菜单中，单击“Save Project”按钮，保存该工程。

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com



FEKO 仿真原理与工程应用

内容简介

本书基于FEKO的最新版本FEKO 14.0编写，此版本较旧版本新增了时域有限差分（FDTD）算法，支持更多的混合算法和功能特性。本书传递了作者们多年技术支持工作中积累的应用技巧和心得体会，会极大帮助初学者和工程人员提升工作效率。本书涵盖了FEKO的所有重点应用领域，包含多样化及最新的热门应用，如CMA、汽车电磁兼容、生物电磁等，贴近FEKO用户的实际使用场景。读者读完此书会对FEKO的优势和特点有全面的了解。

本书主要适用于从事天线、雷达、微波、射频以及电磁兼容领域相关设计和特性研究的工程技术人员和高校师生等，既可以作为航空航天、汽车、电子、通信、船舶和军工等行业进行工程分析的参考用书，也可以作为计算电磁学和FEKO软件的教学用书和培训教材。


机械工业出版社计算机分社官方微信

关注计算机分社官方微信，回复您购买图书书号中间的五位数字，即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

ISBN 978-7-111-56144-6

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信公众号


机工IT互联网工厂微信服务号


关注Altair微信公众号了解更多FEKO信息

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-56144-6

策划编辑◎张淑谦

封面设计◎ 

51CTO.com
技术成就梦想

ISBN 978-7-111-56144-6


定价：95.00元